



TUGAS AKHIR – ME141501

**PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK *OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION (OTEC)* DI DAERAH BALI UTARA  
SEBAGAI KAWASAN ENERGI MANDIRI**

EDWIN CAESAR YUDANANTA

NRP. 04211440000107

Dosen Pembimbing :

Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc.

PROGRAM SARJANA  
DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



FINAL PROJECT – ME141501

**DESIGN OF *OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION (OTEC)*  
ELECTRICAL POWER PLANT IN NORTH BALI AS INDEPENDENT  
ENERGY AREA**

EDWIN CAESAR YUDANANTA

NRP. 04211440000107

Academic Supervisor :

Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc.

BACHELOR DEGREE PROGRAM  
DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2018

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## HALAMAN PENGESAHAN

**PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK *OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION (OTEC)* DI DAERAH BALI UTARA SEBAGAI KAWASAN ENERGI MANDIRI**

### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System (MEAS)*  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**EDWIN CAESAR YUDANANTA**  
NRP. 04211440000107

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK *OCEAN THERMAL  
ENERGY CONVERSION (OTEC)* DI DAERAH BALI UTARA  
SEBAGAI KAWASAN ENERGI MANDIRI**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System (MEAS)*  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**EDWIN CAESAR YUDANANTA**  
NRP. 04211440000107

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. **Dr. Eddy Setyo K. ST., M.Sc.**  
NIP. 1968 0701 1995 12 1001



**SURABAYA**

**JULI , 2018**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# **PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION (OTEC) DI DAERAH BALI UTARA SEBAGAI KAWASAN ENERGI MANDIRI**

**Nama Mahasiswa : Edwin Caesar Yudananta**

**NRP : 04211440000107**

**Jurusan / Fakultas : Teknik Sistem Perkapalan / FTK – ITS**

**Dosen Pembimbing : Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc.**

## **ABSTRAK**

Temperatur permukaan laut di Indonesia memiliki temperature yang tinggi, kondisi ini menjadi peluang untuk menggunakan *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC) sebagai penghasil energi listrik. Dalam rangka pengembangan kawasan Bali Utara sebagai kawasan energi mandiri maka diperlukan penggunaan OTEC yang cukup potensial. Pada rata-rata temperatur permukaan laut di Bali Utara sebesar 29°C dan temperatur laut dalam sebesar 5,1°C. Kondisi perbedaan temperatur permukaan air laut dan pada kedalaman laut 600 m di Bali Utara mencapai 23,9°C , sehingga berpotensi untuk menggunakan OTEC.

Hasil penelitian perancangan OTEC dengan pembangunan menggunakan sistem land based , dengan siklus tertutup dan menggunakan fluida kerja ammonia dapat menghasilkan daya gross yang dihasilkan sebesar 11,01 MW dan daya net didapati sebesar 11,05 MW. Berdasarkan hasil tersebut OTEC dapat menciptakan kawasan energi mandiri di Bali Utara.

**Kata Kunci : Ocean Thermal Energy Conversion**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**DESIGN OF *OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION*  
(*OTEC*) ELECTRICAL POWER PLANT IN NORTH BALI AS  
INDEPENDENT ENERGY AREA**

**Student Name : Edwin Caesar Yudananta**  
**NRP : 04211440000107**  
**Department / Faculty : Marine Engineering / FTK – ITS**  
**Academic Supervisor : Dr. Eddy Setyo K, ST., M.Sc.**

**ABSTRACT**

Sea surface temperature in Indonesia has a high temperature, this condition becomes an opportunity to use Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) as a producer of electrical energy. In the framework of the development of the area of North Bali as kawsan independent energy it is necessary to use the OTEC potential. On average sea surface temperature in North Bali is 29oC and sea temperature is 5.1oC. Differences in sea surface temperatures and at sea depths of 600 m in North Bali reached 23.9oC, potentially using OTEC.

The result of OTEC design with t using land based system, closed cycle and using ammonia working fluid can produce gross power generated at 11,01 MW and net power is 11,05 MW. Based on these results OTEC can create an independent energy area in North Bali.

Keywords : Ocean Thermal Energy Conversion

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik untuk memenuhi syarat mata kuliah Skripsi (ME141501), Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Selama Proses pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapatkan bantuan beserta masukan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberi dukungan beserta doa kepada saya.
2. Bapak Dr. Eng. Badrus Zaman, S.T., M.T. dan Bapak Prof. Semin Sanuri, S.T., M.T., Ph.D. selaku ketua departemen dan sekretaris departemen teknik sistem perkapalan, FTK-ITS.
3. Bapak Dr.Eng. Trika Pitana, S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang selalu memberikan arahan dan bimbingan tentang perkuliahan.
4. Bapak Dr. Eddy Setyo Koenhardono, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini yang telah banyak memberikan masukan dan pikiran sehingga tugas akhir saya dapat terselesaikan dengan baik.
5. Segenap civitas akademika yang telah memberikan bimbingan dan pengajaran selama perkuliahan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, FTK-ITS.
6. Keluarga angkatan MERCUSUAR'14 sebagai rekan, teman, sahabat dan keluarga selama mengikuti perkuliahan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan yang selalu memberikan dukungan hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.
7. Segenap dosen, teknisi, grader, dan member Laboratorium *Marine Electrical and Automation System* (MEAS) yang selalu memberikan dukungan dan bantuan.

Laporan ini disusun dengan kemampuan dan refrensi bahan yang terbatas .Sehingga penulis mengharapakan saran yang bersifat membangun upaya perbaikan laporan ini dan juga sebagai bekal di masa yang akan dapat. Penulis akan sangat terbuka terhdapa saran dan kritik. Demikian laporan ini disusun dan semoga laporan ini akan berguna bagi pembaca.

Surabaya, 16 Juli 2018

Penulis

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Skripsi .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat Skripsi .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1. OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION.....	5
2.2. Siklus Kerja Ocean Thermal Energy Conversion .....	6
2.3 Tipe Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC).....	8
2.4 Sistem <i>Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)</i> .....	9
2.5 Pemanfaatan Hasil Ocean Thermal Energy Conversion .....	14
2.6 Keuntungan dan Kerugian OTEC .....	15
2.7 Overview Perairan Kedalaman Pulau Bali.....	16
2.8 Suhu Permukaan Laut dengan Kedalaman .....	17
2.9 Efisiensi Terhadap Gradient Temperatur OTEC.....	18
2.10 Kondisi Lingkungan OTEC di Bali Utara.....	19
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>23</b>
3.1 Flowchart Penelitian .....	23

3.2 Metodologi Penelitian .....	25
<b>BAB IV PEMBAHASAN .....</b>	<b>27</b>
4.1 Perhitungan Temperatur Laut dalam di Bali Utara .....	27
4.2 Perhitungan Efisiensi Terhadap Gradient Temperatur OTEC .....	41
4.3 Pertimbangan Pemilihan Jenis Sistem dan Siklus Kerja OTEC .....	42
4.4 Pemodelan Sistem OTEC.....	44
4.5 Perhitungan SubSistem OTEC.....	45
4.6 Desain OTEC .....	57
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>61</b>
5.1 Kesimpulan .....	61
5.2 Saran .....	61
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>63</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>64</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>65</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Peta Persebaran OTEC .....	2
Gambar 2.1 Siklus Terbuka OTEC .....	6
Gambar 2.1 Siklus Terbuka OTEC .....	6
Gambar 2. 2 Siklus Tertutup OTEC.....	7
Gambar 2. 3 Siklus Hybrid .....	8
Gambar 2.4 Land Based OTEC Plant .....	9
Gambar 2.5 Floatin Based OTEC Plant .....	9
Gambar 2.6 Direct Indirect Benefit OTEC .....	15
Gambar 2.7 Peta Kedalaman Laut Pulau Bali.....	17
Gambar 4.1 Peta Bathymetry Kontur Kedalaman Laut Bali Utara.....	28
Gambar 4.2 Jarak Sumber Air Laut Dingin Ke Pembangkit .....	28
Gambar 4.3 Jalur Pipa Air Dingin Berdasarkan Jarak dan Kedalaman Laut Bali Utara.....	29
Gambar 4. 4 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Bulan Januari..	30
Gambar 4. 5 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Bulan Februari	31
Gambar 4. 6 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Maret – April.	32
Gambar 4.7 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Mei.....	33
Gambar 4. 8 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Juni.....	34
Gambar 4. 9 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Juli .....	35
Gambar 4.10 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Agustus .....	36
Gambar 4. 11 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada September ..	37
Gambar 4. 12 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Oktober .....	38
Gambar 4. 13 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada November ..	39
Gambar 4. 14 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Desember ...	40
Gambar 4. 15 OTEC Land Based System.....	42
Gambar 4. 16 Skema Closed Cycle OTEC pada Cycle Tempo 5.1 .....	44
Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Daya Gross dan Daya Nett.....	56
Gambar 4.18 Grafik Daya Pompa dan Daya Parasitic .....	57
Gambar 4.19 Desain 3D OTEC .....	57

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Suhu Permukaan Laut Rata-Rata Sepanjang Tahun 2017 .....	27
Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Januari .....	30
Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Februari .....	31
Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Maret - April	32
Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Mei .....	33
Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Juni .....	34
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Juli.....	35
Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Agustus .....	36
Tabel 4 9 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan September ....	37
Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Oktober .....	38
Tabel 4. 11 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan November..	39
Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Desember ...	40
Tabel 4. 13 Hasil Efisiensi Perhitungan Gradient Temperatur Laut.....	41
Tabel 4. 14 Koefisien Aksesoris Pipa Suction .....	49
Tabel 4. 15 Koefisien Aksesoris Pipa Discharge .....	50
Tabel 4. 16 Thermodynamic Properties of Saturated Ammonia.....	53
Tabel 4. 17 Parameter OTEC.....	55
Tabel 4. 18 Power Output OTEC.....	56
Tabel 4. 19 Warm Water Pipe Specification.....	58
Tabel 4. 20 Cold Water Pipe Specification.....	58
Tabel 4. 21 Working Fluid Pipe Specification.....	59

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

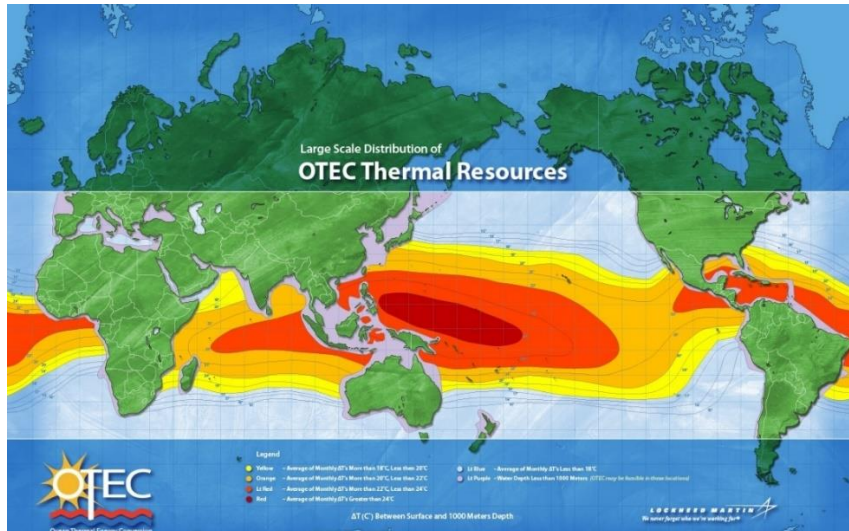
## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat sehari-hari, merupakan salah satu solusi terjadinya kelangkaan energi masa depan di Indonesia. Energi terbarukan merupakan energi yang ramah lingkungan sehingga pemanfaatannya dapat mengurangi dampak dari global warming yang menjadi isu besar saat ini. Potensi energi terbarukan di Indonesia sekarang sangatlah kaya dengan sumber energi tetapi masih kurang pemanfaatannya untuk sumber energi terbarukan. Menurut data Badan Informasi Geospasial (BIG) panjang keseluruhan garis pantai Indonesia adalah 99.093 kilometer. Hal tersebut menjadi keuntungan bagi Indonesia dari segi besarnya potensi energi laut berupa energi pasang surut, energi gelombang, energi arus, energi perbedaan suhu lapisan air laut, dan energi perbedaan salinitas kadar garam.

Menurut BP yang telah merilis konsumsi energi terbesar Indonesia di tahun 2017 masih didominasi oleh minyak bumi 41%, batu bara 36%, dan gas 19%. Sementara produksi minyak di Indonesia hanya mampu mencukupi 55% dari kebutuhan konsumsi dalam negeri. Kondisi ini menjadikan Indonesia sebagai negara dengan sumber energi yang tidak mandiri. Hal ini dibuktikan dengan impor bahan bakar minyak yang semakin besar, dimana harga bahan bakar minyak akan menjulang tinggi saat terjadi kelangkaan bahan bakar dunia.

Sebagai salah satu contoh daerah yang belum menjadi kawasan energy mandiri adalah pulau Bali. Pulau Bali merupakan pulau yang terkenal sebagai daerah pariwisata internasional dan mempunyai luas 5780 km<sup>2</sup> serta jumlah penduduk 4,2 juta jiwa. Berdasarkan data dari PLN Distribusi Bali, kebutuhan listrik di Bali diperkirakan sekitar 734,8 MW pada kondisi beban puncak. Hampir 50% atau 320 MW, kebutuhan listrik ini disuplai dari pulau Jawa melalui kabel bawah laut, sedangkan sisanya dipenuhi dari pembangkit listrik di Pemaron sebesar 90 MW, Gilimanuk 130 MW, dan Pesanggaran 321 MW. Dimana semua kebutuhan listrik di Bali ini menggunakan sumber energi dari batubara, bahan bakar minyak dan gas. Oleh karena itu, guna menciptakan Bali sebagai kawasan energy mandiri, seyogyanya Bali mulai merancang untuk menggunakan sumber energi terbarukan yang sangat melimpah, contohnya seperti panas matahari maupun potensi energy laut yang tersedia secara melimpah. Pada tugas akhir ini, energy terbarukan yang akan dibahas untuk diaplikasikan di pulau Bali adalah energi perbedaan suhu lapisan air laut yang dikenal sebagai *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC).



Gambar 1. 1 Peta Persebaran OTEC  
Sumber: Martin , Lockheed (2008)

Sumber energi terbarukan yang harus dimanfaatkan dengan baik yaitu adalah *Ocean thermal Energy Conversion (OTEC)* yang bisa menjadi solusi untuk energy yang aman dan ramah lingkungan. *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)* menggunakan perbedaan suhu panas permukaan air laut dan suhu dingin kedalaman air laut yang akan mengoperasikan generator untuk menghasilkan energi listrik. OTEC ini mempunyai dua sistem yang mana adalah sistem tertutup dan sistem terbuka serta mempunyai kelebihan dan kelemahan tersendiri sistem tersebut. Secara garis besar, sistem tertutup lebih unggul daripada sistem terbuka pada efisiensi dan sistemnya.

Potensi OTEC yang dimiliki Indonesia terbentang mulai laut di selatan Pulau Sumatra, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Laut Sulawesi yakni antara Pulau Kalimantan dan Sulawesi, Laut Banda hingga Laut Arafuru. Pada potensi pengembangan OTEC di Pulau Bali ini terbilang sangat berpotensi untuk dibangunnya sumber energy tersebut dikarenakan di Pulau Bali itu sendiri untuk suhu permukaan laut sebesar suhu rata-rata 28°C dan untuk suhu laut dalamnya sebesar suhu rata-rata 5°C. Dengan perbedaan lebih dari 22-24°C maka Pulau Bali Utara ini sangat berpotensi. OTEC ini menggunakan permukaan laut yang dipanaskan oleh sinar matahari dengan mencapai suhu rata-rata 25°C sedangkan setelah kedalaman 1000 m suhu bisa mencapai 5°C di suhu ini merupakan suhu yang sangat dingin. Terjadi perubahan suhu yang amat drastic dimana suhu air berubah sekitar 20°C. Untuk keperluan OTEC yang ideal diperlukan perbedaan suhu 22-24°C. Sumber energi terbarukan ini dapat membantu masyarakat untuk menunjang kebutuhan listrik di daerahnya tersebut dan teknologi ini dapat menghasilkan air tawar yang bisa di dimanfaatkan untuk keperluan sehari-hari penduduk sekitar. Dengan energy ini dapat diandalkan yang bisa menjadikan kawasan ini sebagai kawasan energi mandiri.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dari uraian di atas maka permasalahan utama yang akan dibahas adalah sebagai berikut:

1. Berapa besarnya potensi pengembangan *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC) di daerah Bali Utara?
2. Bagaimana desain model *Closed Cycle Ocean Thermal Energy Conversion* yang sesuai dengan kondisi di daerah Bali Utara?
3. Bagaimana perhitungan subsistem yang dibutuhkan dalam perancangan pembangkit listrik *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC) di daerah Bali Utara?

## 1.3 Tujuan Skripsi

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui potensi *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC) yang ada di kawasan Bali Utara.
2. Mengetahui peluang pengembangan OTEC untuk menciptakan kawasan energi mandiri di Bali Utara.
3. Mengetahui subsistem yang dibutuhkan oleh OTEC.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jalur Pelayaran tidak berpengaruh terhadap perancangan OTEC.
2. Perencanaan ekonomi tidak dihitung.
3. Environmental effect tidak dibahas.
4. Desain perpipaan bawah laut tidak dibuat

## 1.5 Manfaat Skripsi

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah

1. Mengembangkan pengetahuan tentang sumber energi terbarukan.
2. Mengoptimasikan potensi energi laut di kawasan Bali Utara
3. Memberikan pengetahuan kepada pembaca tentang pembangkit listrik energy terbarukan yaitu *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC).
4. Mengembangkan potensi OTEC yang akan menjadikan suatu kawasan energi mandiri.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION

*Ocean Thermal Energy Conversion* adalah salah satu energi terbarukan yang mana menggunakan bahan bakar air laut yaitu *sea surface warm water* dan *deep sea cold water*. Permukaan pada air laut ini digunakan sebagai media thermal panas sinar matahari yang dipergunakan untuk menggerakkan turbin sehingga turbin dapat berputar dan bisa menghasilkan listrik lewat generator. Siklus kerja *Ocean Thermal Energy Conversion* ini terbagi atas 3 siklus yaitu adalah siklus terbuka (Open Cycle), Siklus Tertutup (Closed Cycle) , Siklus Hybrid (Hybrid Cycle). Pada siklus tersebut, permukaan air laut dengan temperatur yang sekitar 25-30° C, ini dipompa menggunakan pipa, lalu air laut hangat ini masuk ke dalam vakum yang mana ruang ini untuk mengevaporasikan air menjadi uap. Hasil dari perbedaan tekanan diantara tekanan uap air dan tekanan didalam turbin jadi uap air yang sudah masuk kedalam turbin dapat memutar sudu-sudu turbin sehingga rotor turbin ini menghasilkan sumber listrik. Adapun uap air ini mengalir kembali ke kondensator, untuk dikondensasikan lagi oleh air laut dingin yang mana dipompa dari kedalaman 1000 m ini telah melalui proses destilasi jadi dari air laut menjadi air tawar.

Temperatur pada air laut di permukaan jelaslah berbeda dengan temperatur air laut di dalam laut. Semakin dalam air lautnya , semakin dingin temperturnya. Di permukaan laut yang terpapar sinar matahari akan menjadi air hangat, yang mana temperturnya sekitar 24 °C, dan setelah kedalaman air laut sekitar 600-1000 meter yang gelap dan mempunyai temperatur sekitar 5 ° C yang sangat dingin. Adanya perubahan yang sangat tajam yang terjadi di kedalaman 100 m sampai 500 m, yang mana temperatur air berubah dari sekitar 20 - 30°C menjadi sekitar 4 - 5 ° C, Adanya penurunan drastis ini dikenal sebagai termoklin. Sebagai temperature yang dibutuhkan OTEC ideal dibutuhkan perbedaan suhu sekitar 22-24° C antara air permukaan laut dan air laut dalam.

Untuk *working cycle Ocean Thermal Energy Conversion* dikatakan sama dengan *working cycle* hidrologi bumi karena saat siang hari , panas matahari membawa molekul-molekul air yang menguap ke langit membentuk awan dan angin ke arah daratan, dan terjadilah proses kondensasi di langit, jadi air yang sebelumnya uap kembali menjadi cair sehingga berlangsung ke daratan . Siklus kerja ini yang dipakai oleh *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)* yang mana air laut dipompa pada permukaan yang bertemperatur hangat lalu melalui proses evaporasi dan terjadi pembentukan uap bertekanan untuk memutar turbin sehingga dapat menghasilkan listrik lalu melalui proses kondensasi dengan air laut yang bertemperatur dingin yang dipompa di kedalaman laut sekitar 1000 m kemudian pada siklus tersebut proses ini berulang.

*Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)* secara inti memanfaatkan adanya perbedaan temperatur dimana dengan adanya permukaan air laut hangat

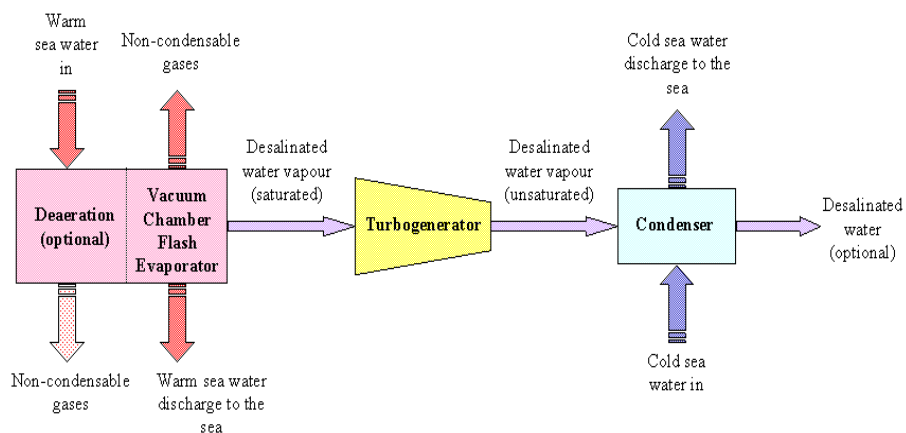
dengan air laut dingin di kedalaman laut. Pada siang hari dan malam hari temperatur air laut akan berubah sedikit untuk di daerah tropis jadi pembangkit listrik ini dapat membangkitkan listrik secara lanjut terus menerus. (Yasser, 2008)

## 2.2. Siklus Kerja Ocean Thermal Energy Conversion

Siklus kerja OTEC secara garis besar dapat dibagi kedalam 3 kategori yaitu siklus tertutup, siklus terbuka dan siklus hybrid.

### 2.2.1 Siklus Terbuka

Dalam siklus terbuka, air laut merupakan fluida kerja. Air laut hangat dipompa kedalam evaporator dimana tekanan serendah 0,03 bar menyebabkan air mendidih pada suhu 22°C. Uap mengembang melalui turbin bertekanan rendah yang dihubungkan ke generator yang menghasilkan energi listrik. Uap bertekanan rendah, setelah melewati turbin, dapat dikondensasi oleh air dingin pada sebuah ruang dan dibuang kembali ke laut. Sebaliknya dari kondisi kondensasi dengan air dingin uap dapat dialirkan menuju *heat exchanger*. Pada kasus ini, uap yang terkondensasi menjadi sebuah sumber air tawar atau disebut destilasi. (Bechtel & Netz, 2016)

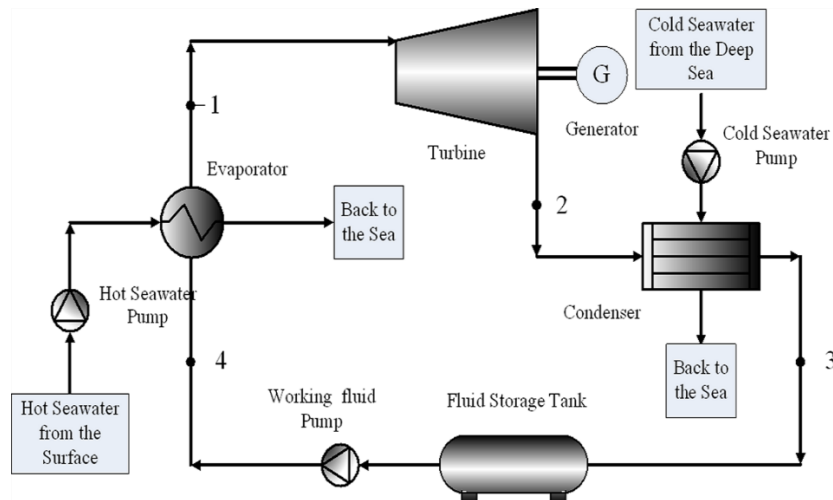


Gambar 2.1 Siklus Terbuka OTEC  
Sumber : (strath, 2008)

### 2.2.2 Siklus Tertutup

Siklus tertutup ini menggunakan fluida kerja dengan titik didih yang rendah, seperti halnya ammonia, yang mana tujuannya untuk menggerakkan turbin yang berguna menghasilkan listrik melalui generator. Air laut di permukaan yang hangat dipompa menuju heat exchanger (penukar panas) di mana fluida dengan titik didih rendah tadi diuapkan. Fluida ini mengalami proses perubahan wujud dari cair menjadi uap yang mana akan mengalami peningkatan tekanan. Uap yang bertekanan tinggi ini segera dialirkan ke turbin untuk menghasilkan listrik dan

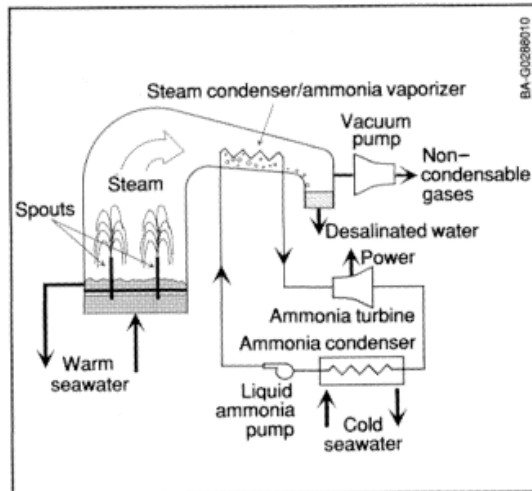
dibangkitkan melalui generator. Setelah itu air dingin dari laut dalam dipompa melewati heat exchanger, lalu terjadi proses kondensasi dan menghasilkan hasil penguapan tadi menjadi fluida lagi, yang mana siklus ini akan berputar terus menerus. (Bechtel & Netz, 2016)



Gambar 2. 2 Siklus Tertutup OTEC  
Sumber : (Jianying Gong, 2012)

### 2.2.3 Siklus Hybrid

Siklus Hybrid ini merupakan kombinasi antara siklus tertutup dan siklus terbuka dimana flash evaporator seawater digunakan sebagai fluida kerja siklus tertutup. Air laut hangat memasuki ruang vakum dimana flash evaporator menguap menjadi uap, yang mirip dengan proses penguapan siklus terbuka. Uap akan menguapkan cairan kerja dari loop siklus tertutup di sisi lain alat penguap ammonia ; cairan vaporizer kemudian menggerakkan turbin yang menghasilkan listrik. Uap mengembun di dalam heat exchanger untuk menghasilkan air yang terdesinasi. (Bechtel & Netz, 2016)



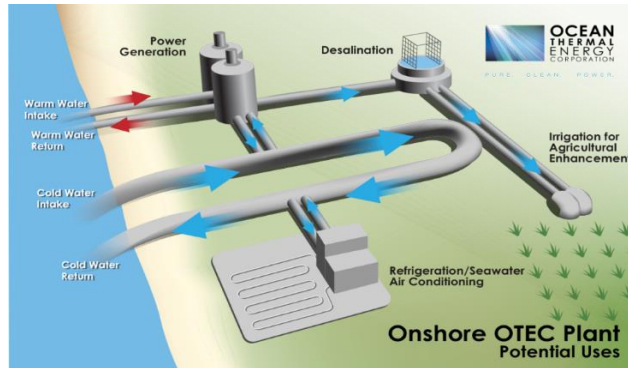
Gambar 2. 3 Siklus Hybrid  
Sumber : (Division, 1989)

## 2.3 Tipe Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)

OTEC mempunyai dua macam pembangkit listrik yaitu adalah Land Based dan Floating Based yang mempunyai karakteristik masing-masing.

### 2.3.1 Land Based

Tipe Land Based ini pembangkit yang berbasis di darat atau onshore yang mana akan terdiri dari beberapa bangunan. Bangunan ini akan berisi Heat Exchanger, Turbine, Generator, dan sistem control. Yang mana akan terhubung ke lautan melalui beberapa pipa dan sebuah fish farm dengan pipa yang lain. Air hangat dikumpulkan melalui pipa yang berada dekat dengan pantai. Untuk pipa air dingin dikumpulkan melalui pipa panjang yang berada di dalam lautan. Energi dan air bersih dapat dihasilkan di dalam bangunan menggunakan peralatan. Air desalinasi ini dapat digunakan untuk kolam ikan dan sebagainya.

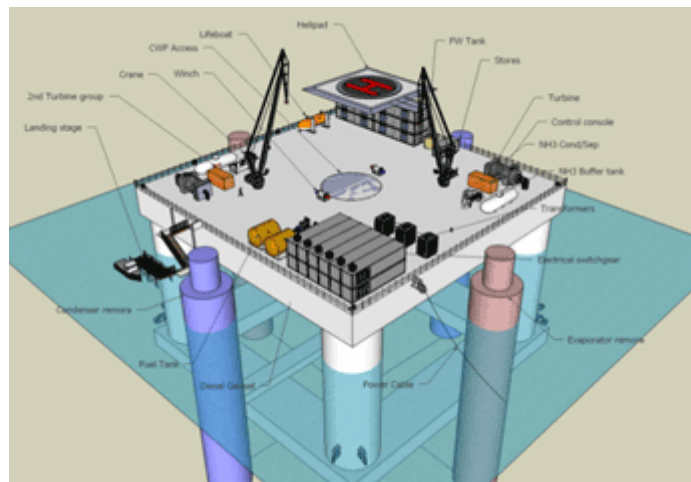


Gambar 2.4 Land Based OTEC Plant

Sumber : (Websdale, 2014)

### 2.3.2 Floating Based

Tipe Floating based ini merupakan pembangkit yang bangunannya berada di lepas pantai yang mana tata letaknya jauh dari daratan. Ini merupakan bangunan yang sangat kompleks dikarenakan plant ini desainya sulit untuk di stabilisasikan. Pada plant ini terdiri dari bangunan mengapung heat exchanger , turbine , generator dan sistem control serta perpipaan.



Gambar 2.5 Floatin Based OTEC Plant

Sumber : (strath, 2008)

## 2.4 Sistem *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*

Sistem OTEC terdiri dari beberapa subsistem yang dapat mendukung program pembangkitan listrik berbasis thermal laut yang memanfaatkan perbedaan temperature air laut hangat dan air laut dingin.

## 2.4.1 Subsistem pada power plant

### a. Turbin and generator

Turbin dan generator pada OTEC ini memegang peranan penting untuk berjalannya sistem dengan menggunakan energi terbarukan. Untuk turbin yang digunakan yaitu turbin uap biasanya digunakan turbin axial dan radial dari single stage atau multiple stage, untuk rasio tekanannya ditentukan oleh fluida kerja dan kecepatan turbin adalah sesuatu yang sangat penting. Turbin dan generator menyatu dalam satu unit. Untuk efisiensi turbin-generator memegang peranan penting di keseluruhan efisiensi dari daya generator. Tenaga yang dihasilkan dapat ditulis seperti berikut,

$$\dot{W}_t = \dot{m} w f \cdot \eta_t \cdot \eta_g (h_1 - h_{2s}) \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :  $\dot{m} w f$  : laju air massa fluida (kg/s)

$\eta_t$  : efisiensi isentropic turbin

$\eta_g$  : efisiensi isentropic generator

$h_1$  : entalpi pada kondisi 1

$h_{2s}$  adalah isentropik *enthalpy* pada keluaran turbin dan dapat dihitung menggunakan,

$$h_{2s} = h_{2f} + x_{2s} \cdot h_{2fg} \dots\dots\dots(2)$$

dimana  $h_{2f}$  dan  $h_{2fg}$  adalah *enthalpy* cair jenuh dan *enthalpy* dari evaporasi pada P2. Kualitas isentropik  $x_{2s}$  dapat dituliskan,

$$x_{2s} = (s_1 - s_{2f}) / s_{2fg} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana  $s_1$  adalah entropi pada kondisi 1 ;  $s_{2fg}$  adalah entropi dari evaporasi.

Maka diperoleh efisiensi termal sebesar,

$$\eta = (\dot{W}_t - \dot{W}_p - \dot{W}_{pcw} - \dot{W}_{pww}) / \dot{Q}_{in} \dots\dots\dots(4)$$

### b. Heat exchanger

Evaporator mempunyai 2 tipe yaitu *shell and tube* dan *plate type*. *Shell and tube* type lebih banyak digunakan. *Plate type* lebih unggul dikarenakan, yang pertama terjadi lebih banyak adanya penukaran panas per meter persegi dengan tekanan penguapan yang sama. Yang kedua *plate type* lebih banyak menghasilkan listrik. Yang ketiga kuantitas dari fluida kerja lebih sedikit yang dibutuhkan dan lebih banyak menghasilkan electricity. Heat Exchanger mempunyai dua sisi yaitu untuk air laut dan untuk fluida kerja. Material yang digunakan adalah stainless steel dan titanium. Parameter yang mempengaruhi termasuk temperatur masuk air

laut dan temperatur keluar di heat exchanger. Fluida kerja terevaporasi menjadi uap jenuh setelah menerima panas dari air laut hangat.

Kalor yang diserap oleh evaporator adalah

$$Q_{in} = \dot{m} w f . (h_1 - h_4) \dots\dots\dots (5)$$

Dimana :  $Q_{in}$  adalah kalor yang diserap evaporator (kj/kg)

$h$  adalah spesfic enthalpy ( kj/kg)

Log Mean Temperature Difference :

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \dots\dots\dots (6)$$

Dimana :  $\Delta T_1$  :  $T_{influid} - T_{outwater}$  (°C)

$\Delta T_2$  :  $T_{outfluid} - T_{inwater}$  (°C)

Heat transfer area :

$$A_h = \frac{th \times Q_{in}}{U \times LMTD} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana :  $th$  adalah ketebalan material heat exchanger (m)

$Q_{in}$  : kalor yang diserap (kj/kg)

$U$  : Spesific Heat Coeffienct (W/ m °C)

#### 2.4.2 Sistem saluran perpipaan termasuk :

##### a. Cold Water Pipe (CWP)

*Cold Water Pipe (CWP)* ini merupakan saluran untuk mengantarkan air dingin yang diambil dengan kedalaman kurang lebih 1000 m yang akan digunakan untuk siklus OTEC tersebut. Untuk panjang CWP ditentukan oleh kebutuhan temperatur untuk memenuhi syarat yang bisa dikatakan sebagai air dingin untuk siklus dengan laju aliran air tertentu. Panjang pipa ini dengan menentukan delta T yang mana perbedaan temperatur mencapai 20-24°C.

##### b. Warm water pipe

Warm water pipe atau bisa dikatakan saluran air laut hangat merupakan saluran untuk mengantarkan air hangat pada permukaan laut yang mana dengan kedalaman kurang lebih 0-20 m lalu air hangat ini digunakan untuk mengevaporasikan fluida kerja .Pipa yang digunakan tidak terlalu panjang seperti pada CWP , pipa diharuskan menggunakan pipa dengan material yang kuat dan anti korosi. Seperti contoh pipa yang terbuat dari bahan Fiber-Reinforced Plastic (FRP). Dibandingkan dengan Carbon Steel , pipa ini lebih

tahan terhadap korosi, dapat memperpanjang lifetime pipa lebih lama dan tidak perlu corrosion inhibitor, cathodic protection.

### c. OTEC Water pump

Hal yang sangat diperlukan pada OTEC adalah dengan menggunakan air laut dingin yang didapat pada kedalaman laut dalam untuk mengkondensasikan uap ataupun mengevaporasikan uap fluida pada sistem OTEC. Diperlukan aliran air dengan drag loss yang kecil dan CWP harus mempunyai material yang tahan dan anti korosi.

Untuk menghitung laju massa air laut dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m_{sw} &= \rho \cdot v \cdot A \\ &= \rho \cdot v \cdot D^2 \cdot (\pi/4) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

Dimana :  $\rho$  : Massa jenis air laut (kg/m<sup>3</sup>)  
 $v$  : Kecepatan aliran (m/s)  
 $A$  : Luas area pipa (m)

Untuk perhitungan daya pompa air laut dengan persamaan berikut :

$$W_{pump} = m_{sw} \cdot v_1 \cdot \Delta P \dots\dots\dots (9)$$

Dimana :  $m_{sw}$  : Laju aliran massa air laut (kg/s)  
 $v_1$  : Volume spesifik dari air laut (m<sup>3</sup>/kg)  
 $\Delta P$  : Tekanan pompa (bar).

Untuk perhitungan tekanan dari persamaan Energi Grade Line (EGL) dan Head Loss pada pipa didapatkan rumusan seperti berikut,

$$\begin{aligned} \left( \frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \left( \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) \right) - \left( \frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \left( \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) \right) &= \Sigma h_l + \Sigma h_{lm} \\ \left( \frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \left( \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) \right) - \left( \frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \left( \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) \right) &= f \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) + K \left( \frac{V^2}{2} \right) + f \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \end{aligned}$$

Karena  $v_1 = v_2$  maka persamaan menjadi seperti pada berikut:

$$\begin{aligned} (P_1 - \frac{P_2}{\rho}) - gz^2 &= \left( \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) + K \left( \frac{V^2}{2} \right) + f \left( \frac{L_e}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \right) \\ (P_1 - P_2) &= \left( \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) + K \left( \frac{V^2}{2} \right) + f \left( \frac{L_e}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \right) + gz^2 \times \rho \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

Dimana :  $P$  (tekanan) ;  $\rho$  (massa jenis fluida) ;  $v$  (kecepatan fluida) ;  $g$  (percepatan gravitasi) ;  $z$  (ketinggian) ;  $h_l$  (head loss mayor) ;  $h_{lm}$  (head loss



minor) ; f (friction factor) ; L (panjang pipa) ; D (diameter pipa) ; K(loss coefficient) ;  $LeD$  (equivalent length of pipe) .

Besarnya volume air laut diperlukan untuk memompa siklus OTEC serta losses pada saluran air laut dingin diperlukan untuk mengetahui friction losses tersebut. Jadi pompa membutuhkan high discharge dan low head pump. Pemilihan pompa ditentukan oleh kapasitas dan head nya. Daya yang dibutuhkan diatur oleh net power pada sistem OTEC tersebut.

#### d. OTEC Working Fluid Pump

Untuk hal ini adalah yang sangat diperlukan pada OTEC yang mana dengan menggunakan fluida kerja. Pompa ini digunakan untuk memompa fluida kerja yang akan terevaporasi dan terkondensasi pada sistem OTEC.

Dengan menggunakan *rumusan heat and mass balance*, pada kondenser untuk menghitung laju aliran massa dari fluida kerja akan didapatkan seperti berikut,

$$(Q_{wf})_c = (Q_{seawater})_c$$

$$\dot{m}_{wf}.C_{pwf}.(T_{wfin}-T_{wfout}) = \dot{m}_{cw}.C_{pcw}.(T_{cwout}-T_{cwin})$$

$$\dot{m}_{wf} = \dot{m}_{cw}.(C_{pcw}C_{pwf}).(T_{cwout}-T_{cwin})(T_{wfin}-T_{wfout})..(10)$$

Dimana :

$\dot{m}_{wf}$  : laju aliran massa fluida kerja (kg/s)

$C_p$  : Specific Heat capacity (Kj/Kg.K)

$T_{cwout}$  : Temperatur keluar kondenser (°C)

$T_{cwin}$  : Temperatur masuk kondenser (°C)

$T_{wfin}$  : Temperatur fluida masuk (°C)

$T_{wfout}$  : Temperatur fluida keluar (°C)

Setelah itu dapat dihitung daya yang dibutuhkan oleh pompa fluida kerja dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$W_p = \dot{m}_{wf}.(h_4-h_3) .....(11)$$

Dimana :  $\dot{m}_{wf}$  : laju aliran massa fluida (kg/s)

h: enthalpy (kj/kg)

Perubahan *enthalpy* pada pompa dapat dihitung dengan persamaan,

$$h_4 = h_3 + Wp/m$$

$$= h_3 + v_3(P_4 - P_3) \dots\dots\dots(12)$$

Dimana :  $h_3$  : enthalpy pada kondisi 3 (kJ/kg)  
 $v_3$  : Volume spesifik (m<sup>3</sup>/kg)  
 $P$  : tekanan (bar)

Ammonia tersusun atas gas nitrogen dan hidrogen. Ammonia merupakan senyawa yang stabil, tidak berbau tajam, dan larut didalam air. Metode utama untuk memproduksi amonia adalah menggunakan proses Haber –Bosch yang mereaksikan hidrogen langsung dengan unsur nitrogen,  $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$ . Ammonia merupakan fluida kerja utama yang biasa digunakan pada sistem pembangkit OTEC siklus tertutup.

Tabel 2. 1 Sifat Fisik Ammonia

No.	Propeties	Nilai	Satuan
1	Rumus Kimia	NH <sub>3</sub>	
2	Massa Molekul	17,031	g/mol
3	Titidk didih (1 atm)	-33,18	oC
4	Temperatur kritikal	132,4	oC
5	Tekanan kritikal	11333	kPa
6	Densitas kritikal	225	kg/m <sup>3</sup>

## 2.5 Pemanfaatan Hasil Ocean Thermal Energy Conversion

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) memiliki beberapa manfaat bagi kehidupan manusia. Pertama, ciri khas OTEC adalah potensi dalam menyediakan listrik baseload, yang berarti di setiap siang dan malam hari serta sepanjang tahun . Ini adalah keuntungan besar di pulau tropis yang biasanya tak memiliki jaringan kelistrikan dan tidak mampu menangani banyak tenaga yang dibutuhkan. OTEC juga menawarkan banyak produk yang bersinergi sebagai berikut :

1. Air Tawar  
Salah satu manfaatnya ini adalah memproduksi pasokan air tawar yang mana sebuah hibrida kecil 1 MW OTEC ini mampu memproduksi 4.500 m<sup>3</sup> air tawar per hari . cukup untuk memasok kebutuhan populasi manusia sebanyak 20.000 orang dengan air tawar ini. Air tawar yang diproduksi OTEC sangat baik dengan desalinasi yang standarnya bagus secara kualitas.
2. Nutrient Food

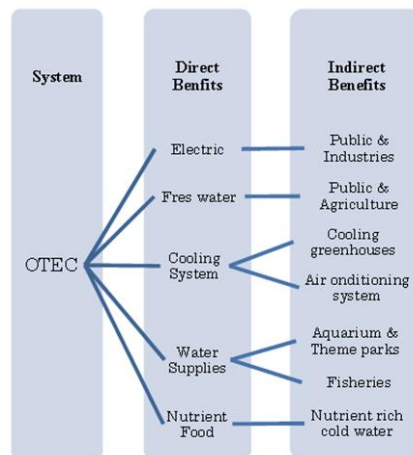
Produk yang dapat dihasilkan OTEC lainnya adalah air dingin yang kaya nutrisi dari air laut dalam. Air “limbah” yang dingin ini dari OTEC dimanfaatkan dalam dua cara. Dimana air dimanfaatkan untuk produksi biota laut multi spesies yang mana hasil panen ini jauh melampaui hasil panen secara alami yang digunakan untuk pertanian atau agriculture di daratan.,

### 3. Sistem Pendingin

Air dingin juga tersedia sebagai pendinginan untuk greenhouse atau sistem pendingin untuk pengkondisian udara seperti AC untuk perhotelan dan sebagainya. Kemungkinan besar terkait dengan menciptakan fasilitas cold storage untuk melestarikan makanan. Saat air dingin sudah ada digunakan dan dilepaskan ke laut dalam.

### 4. Water Supplies

Air Permukaan yang hangat dapat di gunakan untuk suplai air pada sebuah akuarium , taman hiburan dan perikanan seperti industri lobster dan udang. (Koto, 2016)



Gambar 2.6 Direct Indirect Benefit OTEC

Sumber : (Koto, 2016)

## 2.6 Keuntungan dan Kerugian OTEC

### 2.6.1 Keuntungan :

1. OTEC menggunakan sumber daya alam yang bersih dan terbarukan. Air laut hangat dan air laut dingin dapat menggantikan bahan bakar fosil untuk menghasilkan listrik
2. OTEC dirancang dengan baik yang mana menghasilkan sedikit atau tidak ada sama sekali polusi dan bahan kimia yang mencemari lingkungan.

3. Sistem OTEC dapat menghasilkan air bersih dan listrik. Ini merupakan sebuah keuntungan yang besar dimana daerah yang mempunyai air tawar dan listrik yang sangat terbatas.
4. Membantu mengurangi ketergantungan energi bahan bakar fosil impor.

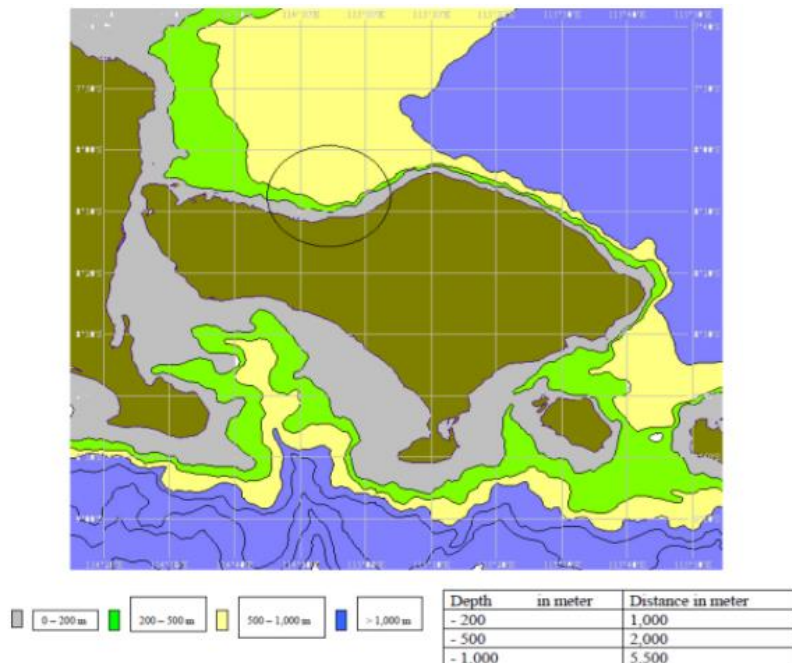
#### 2.6.2 Kerugian :

1. Pembangkit OTEC ini harus ditempatkan dimana perbedaan temperature laut 20°C dan kedalaman laut harus cukup dekat dengan fasilitas pembangkitnya.
2. Pembangunan pembangkit OTEC ini dapat merusak lingkungan bawah laut dikarenakan adanya peletakan pipa di dalam laut.
3. Sedikitnya perusahaan energi yang menginvestasikan proyek pembangunan ini karena hanya ada dalam pengujian skala kecil. (Bechtel & Netz, 2016)

## 2.7 Overview Perairan Kedalaman Pulau Bali

Indonesia merupakan negara yang mempunyai populasi yang sangat besar dan mempunyai sumber daya alam yang tinggi. Kebutuhan akan energi pun sangat tinggi dan disegerakan mungkin untuk mencari sumber energi alternatif atau juga sumber energi terbarukan untuk memnuhi ketergantungan pada sumber energi fosil yang sangat tinggi ini. Salah satu potensi ini adalah pulau-pulau di Indonesia banyak yang bisa dimanfaatkan. Salah satunya adalah sumber energi terbarukan Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) yang mana di pulau Bali ini adalah potensi yang sangat besar untuk sumber energi terbarukan ini.

Secara geografis, Bali terletak diantara dua pulau yaitu pulau jawa dan pulau lombok terletak di 8°25'23" Lintang Selatan dan 115°14'55". Pulau Bali ini mempunyai total luas Area 5.6536,66 km<sup>2</sup>, dengan populasi total 4.200.100 jiwa dan kepadatan 745,13 jiwa/km<sup>2</sup>. Pulau bali mempunyai panjang 153 km dan selebar 112 km serta beriklim tropis.



Gambar 2.7 Peta Kedalaman Laut Pulau Bali

Sumber : (Sinuhaji, 2015)

Sistem OTEC sangat sesuai untuk diterapkan di perairan laut Indonesia karena Indonesia terletak dalam wilayah garis khatulistiwa, terdiri atas banyak pulau-pulau, serta memiliki beragam topografi terutama di bagian utara laut Bali. Laut Utara Bali memiliki iklim tropis dengan temperatur permukaan rata-rata diantara 28° C - 31° C. Laut Bali Utara ini mempunyai kedalaman hingga 200 m – 1000 m. (Anon., 2010)

## 2.8 Suhu Permukaan Laut dengan Kedalaman

Dengan menggunakan persamaan hubungan antara suhu permukaan air laut dengan suhu kedalaman air laut, dengan menghitung nilai (b) sebagai konstanta terhadap fungsi kedalaman. □ □

$$X_n = X_0 + by \dots\dots\dots(13)$$

Dimana:

$X_n$  = Suhu pada kedalaman n (°C)

$X_0$  = Suhu permukaan awal (°C)

b = Konstanta dari fungsi kedalaman

y = Kedalaman laut (m)

Nilai (b) di laut Indonesia didapatkan pada balai konservasi kelautan sebagai berikut :

Tabel 2. 2 Nilai (b) Laut Indonesia

Kedalaman (m)	b
0 - 150	y/-2142
150 - 700	(y-1170)/14309

Dari persamaan 13, dapat dihitung persamaan dari data di perairan laut tropis, yang dalam penelitian ini diambil dan dilakukan validasi dengan data di perairan Bali Utara. (Riyadi, 2015)

## 2.9 Efisiensi Terhadap Gradient Temperatur OTEC

Ocean thermal diantara permukaan air dan kedalaman air harus dikonversi agar mencapai hasil yang maksimal dari thermal itu sendiri. Proses energi thermal ini harus mencapai kisaran water column dengan nilai efisiensi. Dimana ada batas teoritis sampai efisiensi maksimum sistem OTEC dengan mengubah panas yang tersimpan di permukaan air laut tropis yang hangat menjadi pekerjaan mekanik. Berdasarkan yang didefinisikan oleh insinyur Perancis, Sadi Carnot (1824) Nilai efisiensi OTEC dapat dihitung dengan persamaan efisiensi Carnot sebagai berikut :

$$\eta_{\max} = \left( \frac{T_w - T_c}{T_w} \right) \dots \dots \dots (14)$$

Dimana :  $\eta_{\max}$  = Efisiensi

$T_w$  = Absolute suhu air hangat

$T_c$  = Suhu mutlak air dingin

Energi produksi dari thermal laut membutuhkan transfer panas dari sumber di satu suhu ( $T_1$ ) ke heat sink pada suhu yang lebih rendah ( $T_2$ ). Efisiensi memiliki aspek teoritis untuk menentukan hubungan antar variabel teknologi mesin uap yang menghasilkan energi dari potensi panas laut yang dikembangkan dengan cepat dengan efisiensi yang membantu dalam produksi. (Sinuhaji, 2015)

## 2.10 Kondisi Lingkungan OTEC di Bali Utara

Kepulauan Indonesia ini mempunyai berbagai sumber kekayaan alam yang kaya dan banyak yang pemberdayaannya yang sangat melimpah dan bisa dikatakan sangat menguntungkan bagi seluruh rakyat Indonesia. Indonesia ini terletak pada. Dari segi geografis inilah yang membuat Indonesia ini bisa dikatakan Negara yang memiliki kekayaan melimpah dan Indonesia terletak di equator yang sangatlah berpotensi pada pembangunan pembangkit listrik Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Yang mana Indonesia mempunyai panas thermal yang banyak dan mempunyai suhu air laut yang sangat mencukupi untuk diterapkan pembangkit listrik terbaru tersebut. Dengan banyaknya faktor alam yang mendukung OTEC ini dapat dijadikan energy mandiri yang sangat efektif agar daerah-daerah yang kekurangan energy listrik ini dapat terpenuhi kebutuhannya serta dapat membantu pekerjaan masyarakat Indonesia supaya tidak krisis energy listrik.

Lain halnya OTEC dapat menghasilkan energi listrik saja tetapi OTEC mempunyai hasil-hasil produk seperti agrikultur dan akuakultur yang memungkinkan dapat meningkatkan perekonomian masyarakat Indonesia khususnya Bali Utara. Kawasan Bali Utara ini berpotensi untuk perkembangan Ocean Thermal Energy Conversion yang mana salah satu daerahnya adalah di Buleleng-Singaraja. Kawasan laut Bali Utara ini memiliki potensi ataupun syarat yang menjanjikan untuk menghasilkan listrik dan air tawar dari temperatur perbedaan yang cukup signifikan. Pada kawasan laut di perairan Bali Utara ini (Buleleng – Singaraja) ini cukup berpotensi yang mana dijelaskan sebagai berikut :

1. Kawasan pesisir ini dekat dengan kota
2. Memiliki laut dalam mencapai 500-1000 m
3. Jarak laut dalam menuju pesisir antara 500 meter – 4000 meter
4. Mempunyai temperatur permukaan laut yang hangat diatas 27°C
5. Kawasan laut ini mempunyai perbedaan temperatur yang cukup sekitar 21°C-25°C.
6. Kebutuhan energi listrik di Pulau Bali sangat tinggi.

Daerah Kabupaten Buleleng ini mempunyai ekosistem laut, pesisir dan pantai merupakan sumber daya yang sangat penting untuk menopang kehidupan. Kabupaten Buleleng memiliki pantai sepanjang  $\pm 144$  Km, sehingga pada radius 4 mil luas perairan laut adalah  $\pm 1.166,75$  Km<sup>2</sup> membentang dari Barat ke Timur mulai dari Desa Sumberkelompok di Kecamatan Gerokgak sampai Desa

Tembok di Kecamatan Tejakula (Diskanla, 2009). Hampir semua kecamatan memiliki pantai, kecuali Kecamatan Busungbiu dan Sukasada. Kecamatan Gerokgak memiliki pantai terpanjang, yaitu 72,40 Km, diikuti Kecamatan Tejakula sepanjang 19 Km, kemudian Kecamatan Kubutambahan 16,6 Km, Kecamatan Buleleng 14 Km, Kecamatan Seririt 10,20 Km, Kecamatan Banjar 6,60 Km, dan terakhir Kecamatan Sawan dengan pantai paling pendek, yaitu 5,20 Km (BPS Kabupaten Buleleng, 2010). Laut, pesisir dan pantai Kabupaten Buleleng memiliki: terumbu karang, mangrove dan padang lamun. Pemanfaatan laut, pesisir dan pantai jangan sampai merusak kekayaan ekosistem tersebut.

Daerah kawasan Singaraja merupakan bagian dari wilayah Kabupaten Buleleng. Berdasarkan pengamatan di lapangan, pola permukiman di kota Singaraja ini telah mengarah pada perkotaan dengan tingkat keberagaman yang tinggi. Batas-batas Singaraja adalah :

- Sebelah Utara : Laut Bali
- Sebelah Selatan : desa Gitit
- Sebelah Timur : desa Kerobokan
- Sebelah Barat : Desa Pamaron

Daerah Kabupaten Buleleng dan Kota Singaraja merupakan daerah yang akan berkembang dengan konsumsi listrik yang akan meningkat dan dibutuhkan suatu energi baru yang terhindar dari energy fosil yang semakin lama semakin susah didapat. Kawasan laut ini merupakan kawasan yang strategis untuk dibangun pembangkit listrik OTEC dengan kedalaman perairan 500-1000 m yang dapat memenuhi syarat dan kebutuhan listrik tanpa memikirkan ketergantungan terhadap energy fosil serta dapat menambah perekonomian masyarakat untuk kawasan daerah ini.

Pertimbangan letak pembangunan OTEC di Pulau Bali Utara antara lain :

1. Kabupaten Buleleng tepatnya termasuk kota Singaraja yang mana kota terbesar ke 2 di pulau Bali.
2. Penduduk di sekitar kawasan Kabupaten Buleleng cukup banyak tinggal dekat dengan pesisir. Oleh karena itu akan terjadi social impact pada saat membangun power plant.
3. Dekat dengan tempat pariwisata
4. Dipilih lokasi tidak jauh dari pusat kota Singaraja, dan kondisi lahan merupakan pesisir pantai, kebanyakan telah dipakai sebagai lahan



pertambahan, perumahan penduduk belum padat Grid connected dengan PLN setempat akan lebih mudah jika dibangunnya di dekat kota

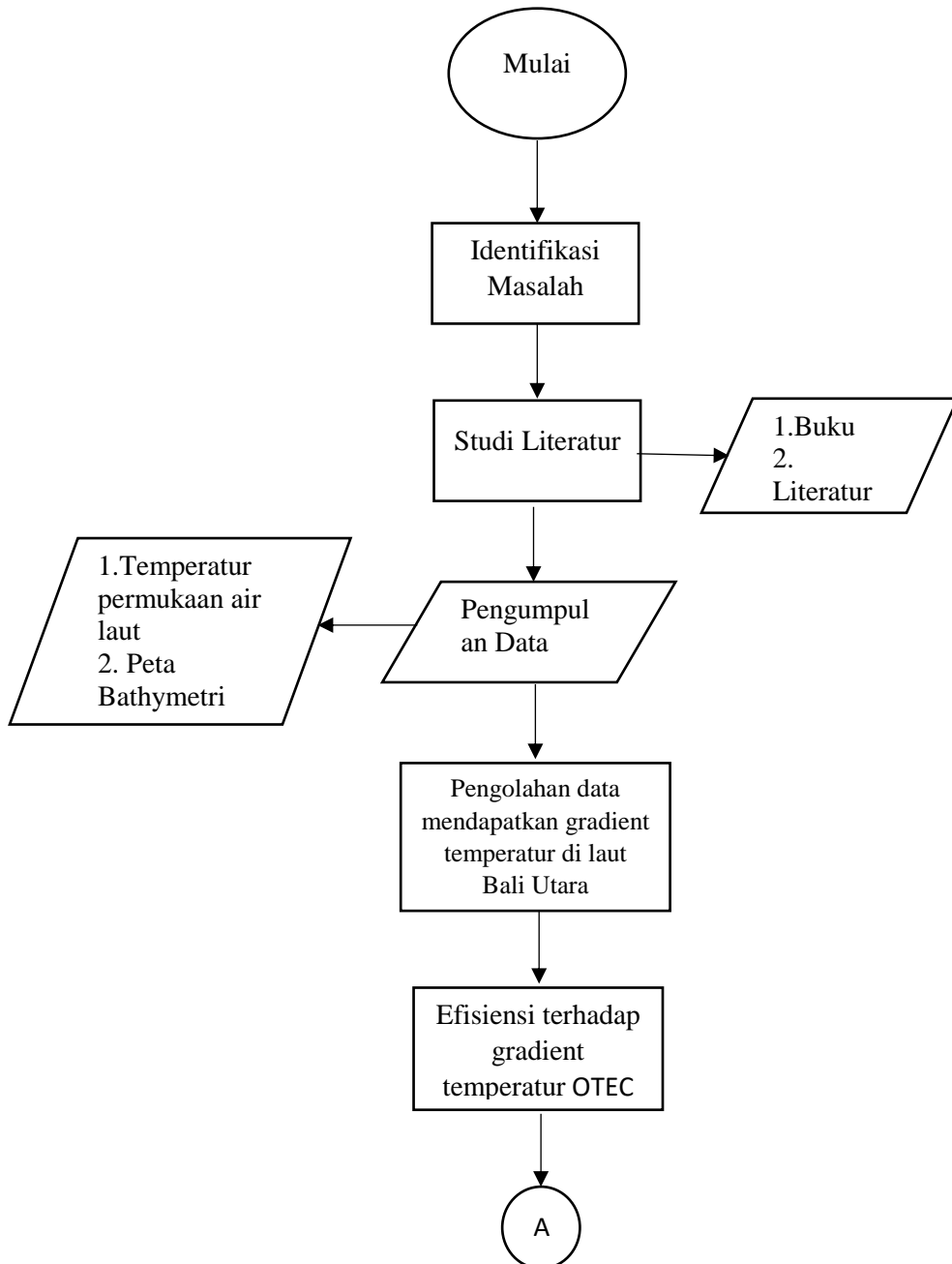
5. Kondisi jarak laut dalam tidak terlalu jauh

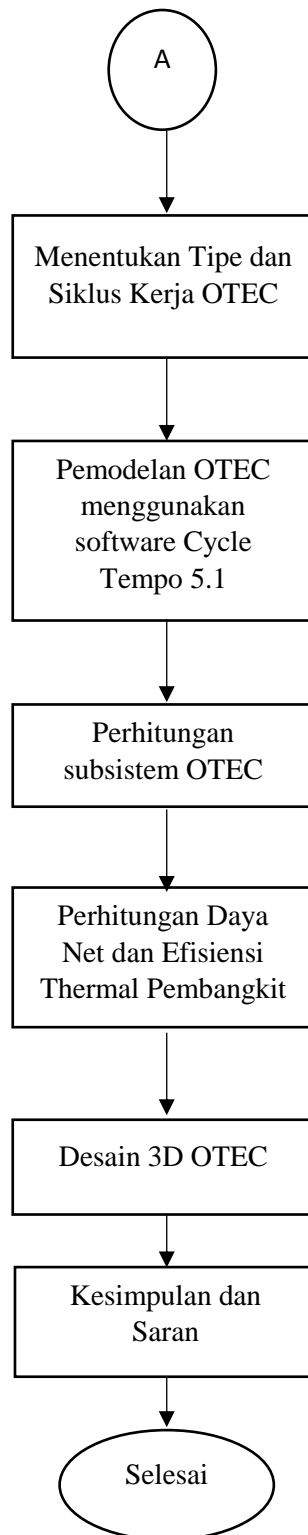
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III

### METODOLOGI

#### 3.1 Flowchart Penelitian





### 3.2 Metodologi Penelitian

Dalam pelaksanaan tugas akhir yang baik perlu memiliki metodologi yang detail dan terperinci dengan sumber informasi yang sebanyak-banyaknya. Untuk mencapai hasil yang maksimal, maka dalam pengerjaan Tugas Akhir ini diperlukan kerangka pengerjaan yang tersrtuktur. Metode yang akan digunakan untuk menyelesaikan masalah diatas digunakan pengolahan data , simulasi sistem otec , perhitungan teknis dan perancangan desain.

Dalam perencanaan pengerjaan ini menggunakan tahapan-tahapan pengerjaan sebagai berikut :

1. Perumusan Masalah  
Tahapan awal yang dilakukan dalam penyelesaian tugas akhir adalah mengidentifikasi masalah pada pembangkit listrik Ocean Thermal Energy Conversion untuk kemudian akan dicari penyelesaiannya pada pengerjaan tugas akhir ini.
2. Studi Literatur  
Pada tahap ini dilakukan pendalaman lebih lanjut untuk memahami teori – teori atau dasar yang diperoleh dari beberapa literatur, buku, serta jurnal mengenai Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) yang akan membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
3. Pengumpulan Data  
Pengumpulan data yang dilakukan diperoleh dengan mengambil data kedalaman laut dari Peta Bathymetry untuk mengetahui kedalaman laut dan pengambilan data dilakukan pada temperatur permukaan air laut yang ada di perairan Pulau Bali Utara yang juga didapatkan karakteristik kawasan laut serta kondisi yang ada di tempat tersebut yang bisa menentukan keberhasilan pembangunan pembangkit listrik OTEC pada sistem tersebut.
4. Pengolahan Data  
Dilakukan pengolahan data untuk mencari temperatur pada kedalaman laut di Bali Utara untuk mencari perbedaan temperatur pada permukaan laut dan pada laut dalam. Setelah itu dilakukan perhitungan efisiensi gradient dari temperatur laut untuk mencari besarnya potensi OTEC tersebut.
5. Perhitungan sistem OTEC  
Pada perhitungan sistem tersebut akan dilakukan terlebih dahulu menentukan tipe dan siklus kerja serta fluida kerja yang akan digunakan OTEC. Setelah itu dibuat pemodelan OTEC dengan menggunakan software Cycle Tempo 5.1. Setelah itu dilakukan perhitungan kebutuhan daya pompa air laut hangat , air laut dingin serta fluida kerja. Yang mana akan didapatkan

requirement dari setiap subsistem tersebut. Dilakukan perhitungan daya netto dan efisiensi thermal pada sistem OTEC tersebut.

6. Desain OTEC

Dilakukan perancangan desain pembangkit listrik OTEC dengan berbasis 3 dimensi yang mana menggunakan software autocad inventor dengan mencantumkan subsistem sebelumnya.

7. Kesimpulan dan Saran

Dilakukan beberapa kesimpulan dari penelitian terhadap perancangan pembangkit listrik Ocean Thermal Energy Conversion sebagai kawasan energi mandiri dan dilakukan penulisan saran untuk yang telah dilakukan.

8. Penyusunan Laporan

Semua hasil penelitian ini selanjutnya akan dilakukan penyusunan laporan sesuai dengan aturan penulisan yang baik dan benar.

## **BAB IV**

### **PEMBAHASAN**

#### **4.1 Perhitungan Temperatur Laut dalam di Bali Utara**

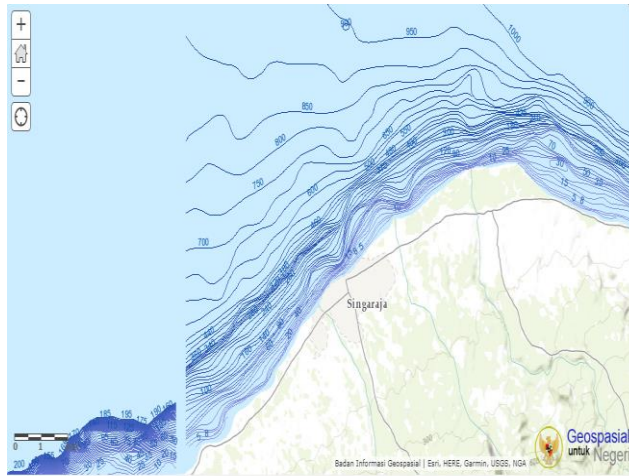
Berdasarkan data , temperatur permukaan laut di Bali Utara ( Dari : Global Sea Temperature dan BMKG – Ocean Forecast System) di dapatkan temperatur rata-rata pada tahun 2017 :

Tabel 4. 1 Suhu Permukaan Laut Rata-Rata Sepanjang Tahun 2017

Bulan	Tw (°C)
Januari	29
Februari	28.7
Maret	29.3
April	29.3
Mei	29
Juni	28.2
Juli	27.3
Agustus	26.9
September	27.2
Oktober	28.2
November	29.2
Desember	29.6
Average	28.5

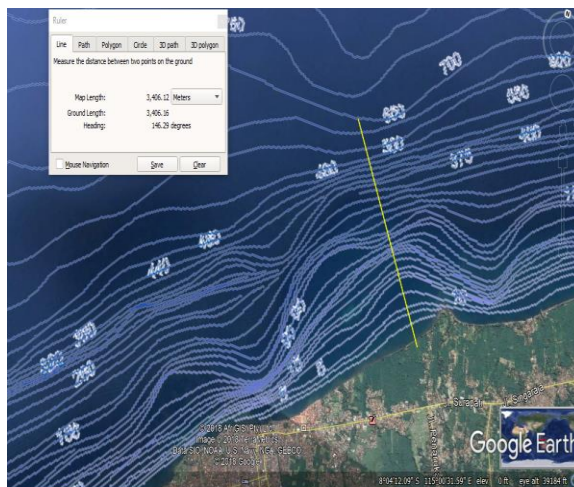
Sumber : Global Sea Temperature dan BMKG – Ocean Forecast System

Kedalaman laut perairan Bali Utara bisa mencapai 1000 m, dalam pengerjaan ini digunakan perairan dengan kedalaman 600 m yang sudah memenuhi kriteria pembangunan site plant OTEC dengan perhitungan sebelumnya.



Gambar 4.1 Peta Bathymetry Kontur Kedalaman Laut Bali Utara  
Sumber : Badan Informasi Geospasial Indonesia (2017)

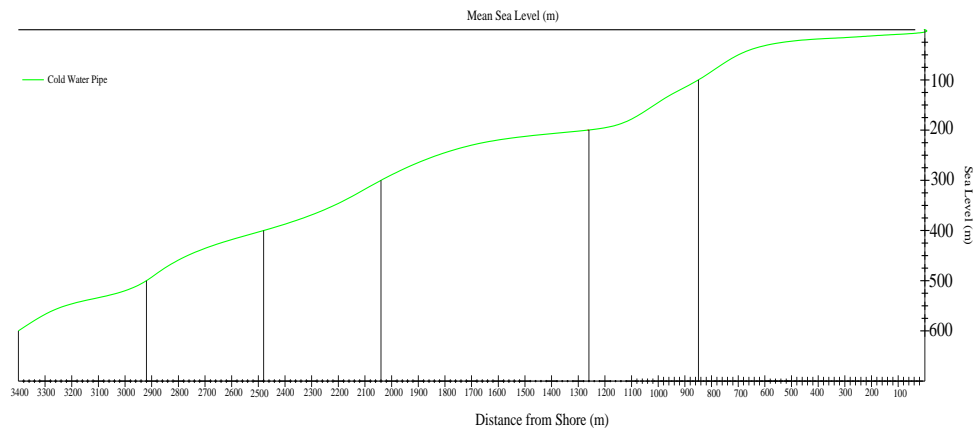
Pada gambar 4.1 merupakan gambar peta bathymetry kontur kedalaman laut Bali Utara yang mana didapat untuk kedalaman laut dalam ini bisa mencapai 100 m hingga 1000 m. Pada penelitian ini air laut dingin ini diambil pada kedalaman 600 m.



Gambar 4.2 Jarak Sumber Air Laut Dingin Ke Pembangkit  
Sumber :Bathymetry in Google Earth (2018)

Pada gambar 4.2 ini merupakan jarak Cold Water Pipe ke pembangkit listrik OTEC didapat sepanjang 3400 m atau 3,4 km dan untuk jarak kedalaman laut sumber air laut dalam 600 m. Untuk gambar 4.3 merupakan jalur pipa air dingin berdasarkan jarak dan kedalaman laut Bali Utara.





Gambar 4.3 Jalur Pipa Air Dingin Berdasarkan Jarak dan Kedalaman Laut Bali Utara

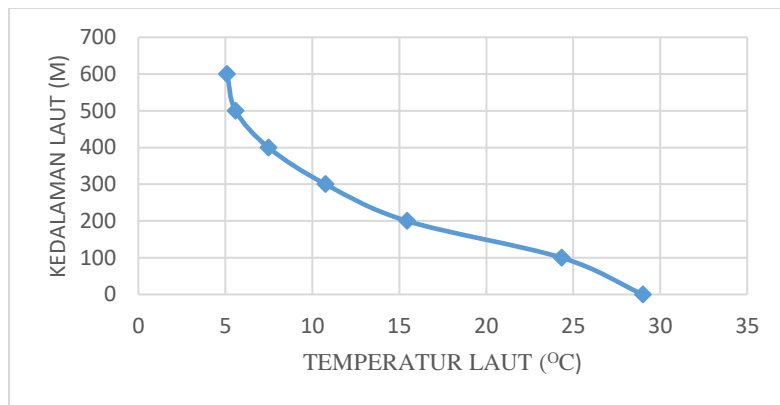
Suhu permukaan air laut pada kedalaman tertentu dapat dihitung dengan menggunakan persamaan hubungan antara suhu permukaan air laut dengan suhu kedalaman air laut. untuk menghitung nilai (b) sebagai fungsi kedalaman konstanta. Serta didapatkan kedalaman dengan temperatur pada kedalaman tertentu.

Dengan menggunakan rumusan pada persamaan (13) untuk menghitung konstanta (b) didapatkan hasil yang dituliskan pada tabel 2. untuk sepanjang tahun 2017. Dari data yang didapatkan akan dianalisa lebih lanjut untuk performa sistem pembangkit yang menggunakan air laut pada kedalaman 100, 200 , 300 , 400 , 500 dan 600 meter divariaskan sebagai berikut. Didapatkan perhitungan hasil rumusan temperatur kedalaman dengan parameter kedalaman y : 600 meter ; b :  $(600-1170)/14309 : -0.04$  ;  $X_0 : 29\text{ }^{\circ}\text{C}$  sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 X_n &= X_0 + by \\
 &= 29 + (600-1170/14309) \cdot 600 \\
 &= 29 + (-0.04) \cdot 600 \\
 &= 5.1\text{ }^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Januari

Januari				
No.	Kedalaman	b	X0	Xn
1	0	0	29	29.00
2	100	-0.047	29	24.33
3	200	-0.068	29	15.44
4	300	-0.061	29	10.76
5	400	-0.054	29	7.48
6	500	-0.047	29	5.59
7	600	-0.04	29	5.10

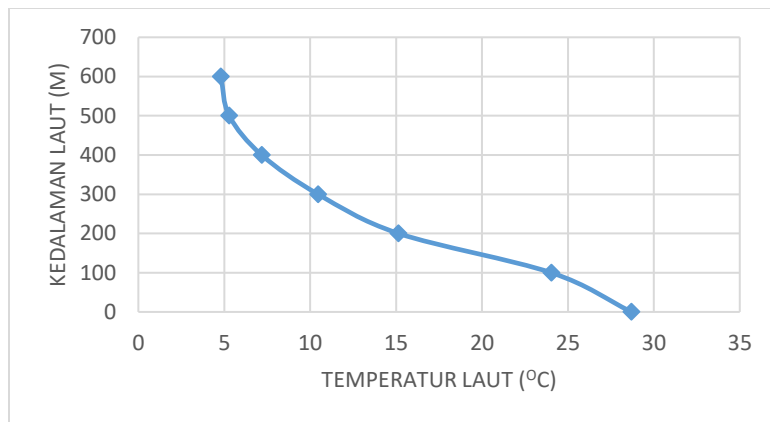


Gambar 4. 4 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Bulan Januari

Pada gambar 4.4 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Januari yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 29°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 5,1°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara air laut hangat dan air laut dingin sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Februari

Februari				
No.	Kedalaman	b	X0	Xn
1	0	0	28.7	28.7
2	100	-0.047	28.7	24.03
3	200	-0.068	28.7	15.14
4	300	-0.061	28.7	10.46
5	400	-0.054	28.7	7.18
6	500	-0.047	28.7	5.29
7	600	-0.04	28.7	4.80

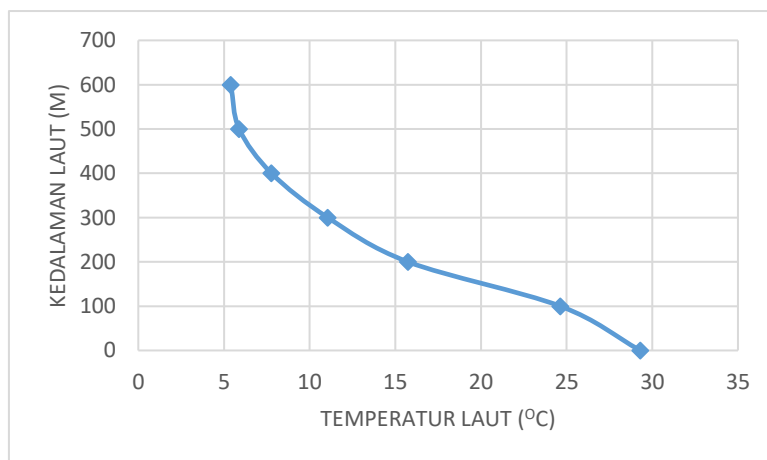


Gambar 4. 5 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Bulan Februari

Pada gambar 4.5 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Februari yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 28,7°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 4,8°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Maret - April

Maret - April				
No.	Kedalaman	b	X0	Xn
1	0	0	29.3	29.30
2	100	-0.047	29.3	24.63
3	200	-0.068	29.3	15.74
4	300	-0.061	29.3	11.06
5	400	-0.054	29.3	7.78
6	500	-0.047	29.3	5.89
7	600	-0.04	29.3	5.40

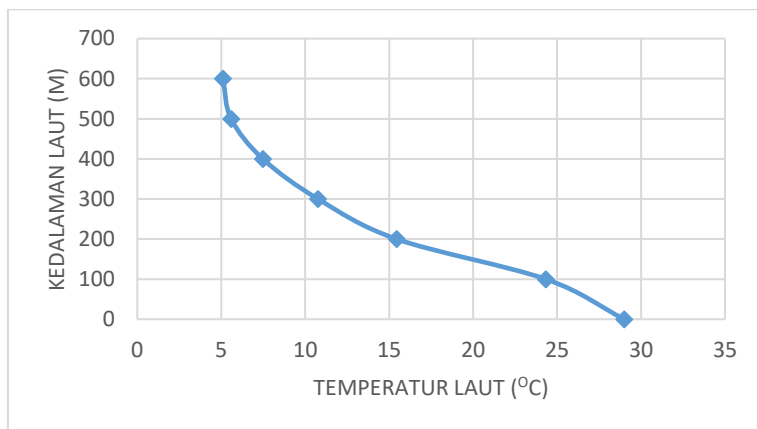


Gambar 4. 6 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Maret – April

Pada gambar 4.6 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Maret-April yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 29,3°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 5,4°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Mei

Mei				
No.	Kedalaman (m)	b	X0 (°C)	Xn (°C)
1	0	0	29	29.00
2	100	-0.047	29	24.33
3	200	-0.068	29	15.44
4	300	-0.061	29	10.76
5	400	-0.054	29	7.48
6	500	-0.047	29	5.59
7	600	-0.04	29	5.10

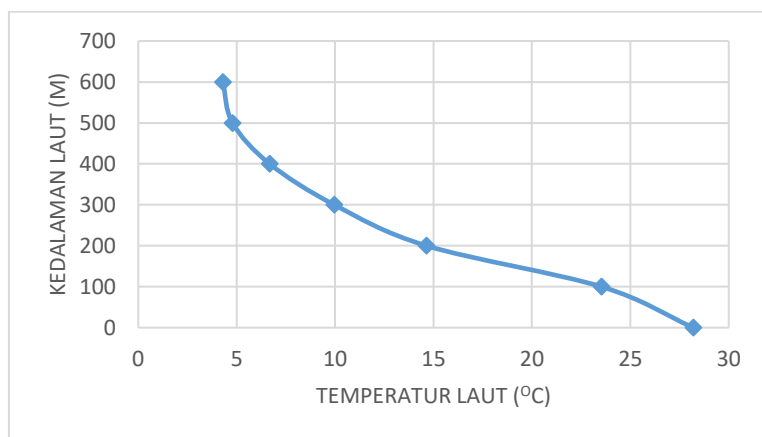


Gambar 4.7 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Mei

Pada gambar 4.7 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Mei yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 29°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 5,1°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Juni

Juni				
No.	Kedalaman (m)	b	X0 (°C)	Xn (°C)
1	0	0	28.2	28.20
2	100	-0.047	28.2	23.53
3	200	-0.068	28.2	14.64
4	300	-0.061	28.2	9.96
5	400	-0.054	28.2	6.68
6	500	-0.047	28.2	4.79
7	600	-0.04	28.2	4.30

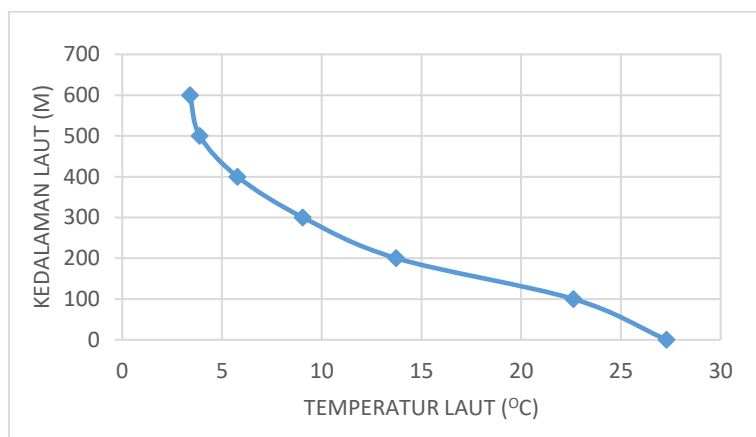


Gambar 4. 8 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Juni

Pada gambar 4.8 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Juni yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 28,2°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 4,3°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Juli

Juli				
No.	Kedalaman (m)	b	X0 (°C)	Xn (°C)
1	0	0	27.3	27.30
2	100	-0.047	27.3	22.63
3	200	-0.068	27.3	13.74
4	300	-0.061	27.3	9.06
5	400	-0.054	27.3	5.78
6	500	-0.047	27.3	3.89
7	600	-0.04	27.3	3.40

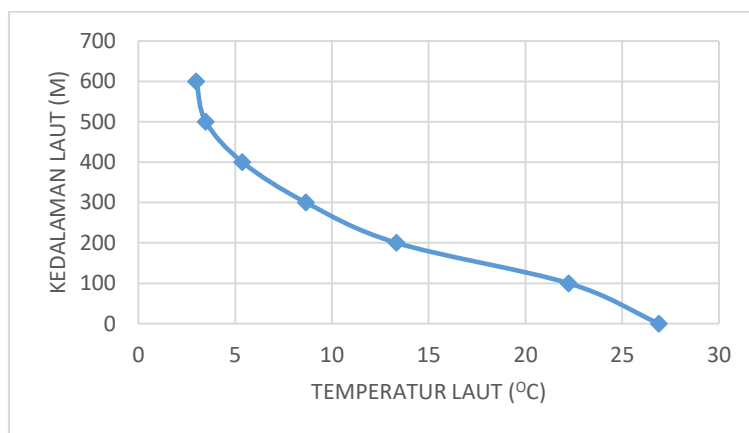


Gambar 4. 9 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Juli

Pada gambar 4.9 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Juli yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 27,3°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 3,4°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Agustus

Agustus				
No.	Kedalaman (m)	b	X0 (°C)	Xn (°C)
1	0	0	26.9	26.90
2	100	-0.047	26.9	22.23
3	200	-0.068	26.9	13.34
4	300	-0.061	26.9	8.66
5	400	-0.054	26.9	5.38
6	500	-0.047	26.9	3.49
7	600	-0.04	26.9	3.00



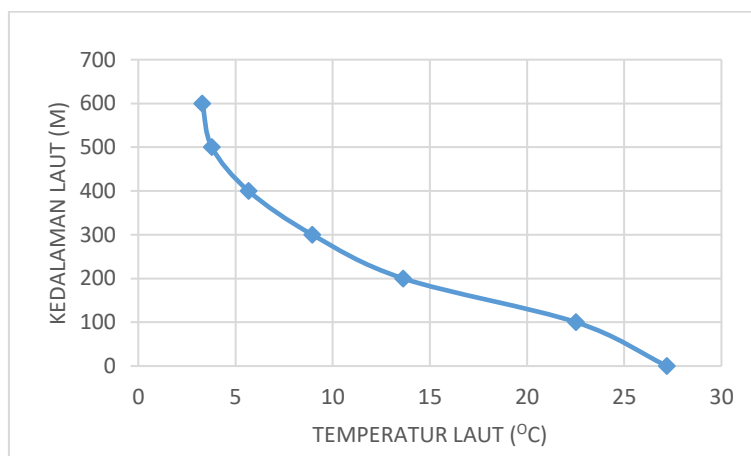
Gambar 4.10 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Agustus

Pada gambar 4.10 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Agustus yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 26,9°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 3°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.



Tabel 4 9 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan September

September				
No.	Kedalaman (m)	b	X0 (°C)	Xn (°C)
1	0	0	27.2	27.20
2	100	-0.047	27.2	22.53
3	200	-0.068	27.2	13.64
4	300	-0.061	27.2	8.96
5	400	-0.054	27.2	5.68
6	500	-0.047	27.2	3.79
7	600	-0.04	27.2	3.30

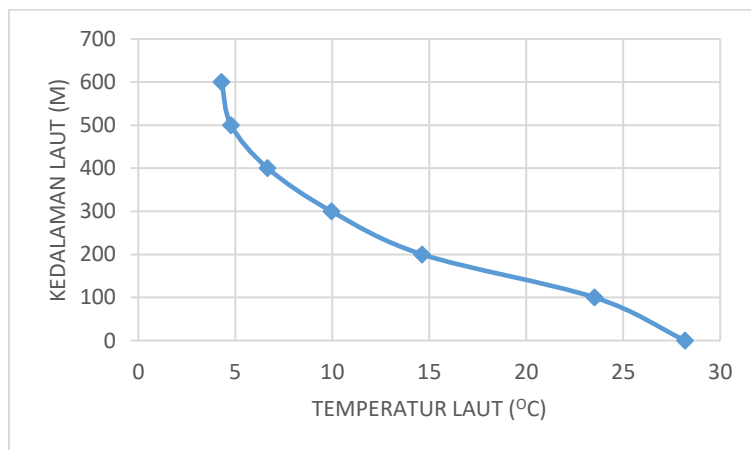


Gambar 4.11 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada September

Pada gambar 4.11 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan September yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 27,2°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 3,3°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Oktober

Oktober				
No.	Kedalaman (m)	b	X0 (°C)	Xn (°C)
1	0	0	28.2	28.20
2	100	-0.047	28.2	23.53
3	200	-0.068	28.2	14.64
4	300	-0.061	28.2	9.96
5	400	-0.054	28.2	6.68
6	500	-0.047	28.2	4.79
7	600	-0.04	28.2	4.30

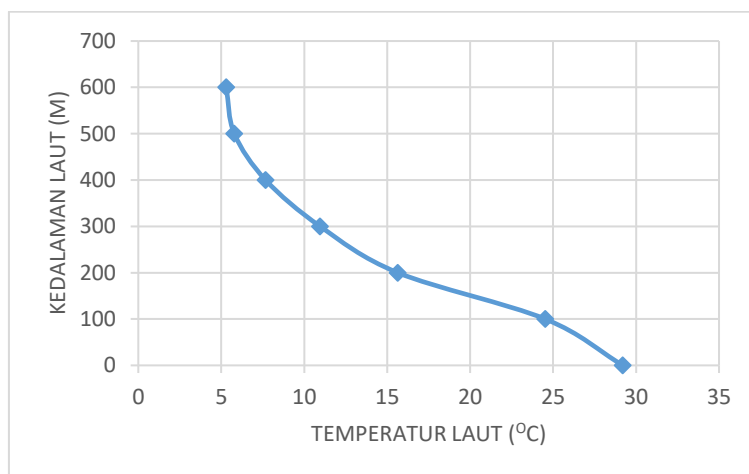


Gambar 4.12 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Oktober

Pada gambar 4.12 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Oktober yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 28,2°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 4,3°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4. 11 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan November

November				
No.	Kedalaman (m)	b	X0 (°C)	Xn (°C)
1	0	0	29.2	29.20
2	100	-0.047	29.2	24.53
3	200	-0.068	29.2	15.64
4	300	-0.061	29.2	10.96
5	400	-0.054	29.2	7.68
6	500	-0.047	29.2	5.79
7	600	-0.04	29.2	5.30

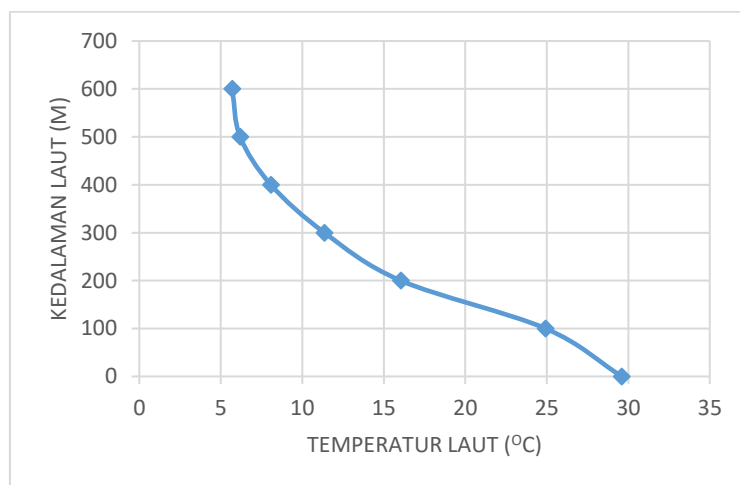


Gambar 4.13 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada November

Pada gambar 4.13 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan November yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 29,2°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 5,3°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Suhu Kedalaman Air Laut Pada Bulan Desember

Desember				
No.	Kedalaman (m)	b	X0 (°C)	Xn (°C)
1	0	0	29.6	29.60
2	100	-0.047	29.6	24.93
3	200	-0.068	29.6	16.04
4	300	-0.061	29.6	11.36
5	400	-0.054	29.6	8.08
6	500	-0.047	29.6	6.19
7	600	-0.04	29.6	5.70



Gambar 4. 14 Grafik Suhu Air Laut Terhadap Kedalaman Laut Pada Desember

Pada gambar 4.14 merupakan grafik hasil perhitungan temperatur laut terhadap kedalaman laut pada bulan Desember yang mana didapatkan pada kedalaman 0 m dengan temperatur 29,6°C dan pada kedalaman 600 m didapatkan temperatur sebesar 5,7°C. Dimana terdapat perbedaan temperatur antara temperatur permukaan air laut hangat dan temperatur air laut dingin di laut dalam sebesar 23,9°C. Dengan perbedaan temperatur tersebut dapat dikatakan berpotensi dan memenuhi kriteria OTEC.

Pada hasil perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa perbedaan temperatur permukaan laut hangat dan temperatur laut dalam dingin didapatkan 23,9°C sepanjang tahun 2017 di Kawasan laut Bali Utara. Yang mana syarat minimum untuk dapatnya di gunakan OTEC ialah dengan minimum temperatur 20°C.

## 4.2 Perhitungan Efisiensi Terhadap Gradient Temperatur OTEC

Ocean thermal diantara permukaan air dan kedalaman air harus dikonversi agar mencapai hasil yang maksimal dari thermal itu sendiri. Proses energi thermal ini harus mencapai kisaran water column dengan nilai efisiensi. Dimana efisiensi maksimum sistem OTEC dengan mengubah panas yang tersimpan di permukaan air laut tropis yang hangat menjadi pekerjaan mekanik. Nilai efisiensi OTEC dapat dihitung berdasarkan persamaan carnot efficiency (12) .

Energi produksi dari panas laut membutuhkan transfer dari sumber di satu suhu (T1) ke heat sink pada suhu yang lebih rendah (T2). Efisiensi memiliki aspek teoritis untuk menentukan hubungan antar variabel teknologi mesin uap yang menghasilkan energi dari potensi ocean thermal ini yang dikembangkan dengan cepat dengan efisiensi yang membantu dalam produksi. Dalam Tabel 4.3 sebagai contoh pada bulan januari didapatkan variabel  $T_w : 29^{\circ}\text{C}$  ;  $T_c : 5.1^{\circ}\text{C}$  untuk mengetahui nilai efisiensi maksimum adalah dengan persamaan (14) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\eta &= (T_w - T_c) / T_w \\ &= (29 - 5.1) / 29 \\ &= 0.8241\end{aligned}$$

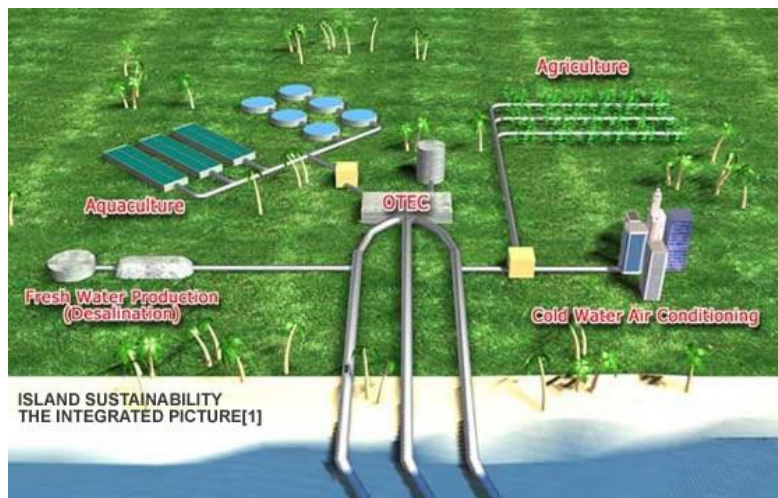
Tabel 4. 13 Hasil Efisiensi Perhitungan Gradient Temperatur Laut

Bulan	$T_w$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\eta$
Januari	29	5.1	0.8241
Februari	28.7	4.8	0.8328
Maret	29.3	5.4	0.8157
April	29.3	5.4	0.8157
Mei	29	5.1	0.8241
Juni	28.2	4.3	0.8475
Juli	27.3	3.4	0.8755
Agustus	26.9	3	0.8885
September	27.2	3.3	0.8787
Oktober	28.2	4.3	0.8475
November	29.2	5.3	0.8185
Desember	29.6	5.7	0.8074
Average	28.492	4.5917	0.8397

Jadi dari perhitungan diatas untuk bulan januari didapatkan efisiensi sebesar 0.8241. Efisiensi ini sangat bagus sehingga laut utara Bali potensial dalam pengembangan suhu air permukaan laut untuk OTEC. Efisiensi tertinggi OTEC ada di bulan Agustus dimana yaitu di 0.888. Namun, ini adalah ideal efisiensi, bahkan tanpa pengurangan yang tidak dapat dihindari yang disebabkan oleh gesekan dan heatloss. Dengan perbedaan temperatur yang lebih dari 20°C maka Bali Utara berpotensi diaplikasikan pembangkit listrik Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC).

### 4.3 Pertimbangan Pemilihan Jenis Sistem dan Siklus Kerja OTEC

#### 4.3.1 Pertimbangan sistem land based



Gambar 4. 15 OTEC Land Based System

Sumber : (strath, 2008)

OTEC land based sistem merupakan salah satu sistem yang terintegrasi dengan sistem pendinginan, sistem desalinisasi air, aquaculture dan agriculture. Land-based sistem memiliki keunggulan yang tidak dimiliki oleh sistem offshore floating sebab dapat dihubungkan dengan usaha aquaculture dan mariculture pada daerah dibangunnya powerplant. Terdapat pipa dengan ukuran besar memompa air dari laut dalam dan juga permukaan dialirkan ke pusat pengelola. Sistem kerja siklus tertutup digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan listrik, sedangkan pipa yang lainnya diteruskan ke stasiun yang berbeda untuk menghasilkan air tawar. Dari stasiun yang menghasilkan air tawar, dilanjutkan ke

bagian agriculture sebagai sumber air untuk tanaman, sedangkan air laut dingin yang masih tersisa dijadikan sebagai media aquaculture.

Pertimbangan menggunakan Land Based System OTEC sebagai berikut :

1. Pemeliharaan terhadap sistem ini mudah.
2. Tidak memerlukan sistem mooring.
3. Tidak memerlukan kabel listrik yang panjang.
4. Biaya maintenance lebih murah daripada menggunakan sistem offshore.
5. Hasil desalinasi air laut dapat dimanfaatkan oleh industri marineculture

Dengan pertimbangan kondisi di Bali Utara yang cocok untuk penempatan OTEC land based adalah didekat daerah PLTU Celukan Bawang , Buleleng yang mana tempat ini jauh dari pemukiman daerah dan tempat wisata sekitar.

#### 4.3.2 Pertimbangan pemilihan *Closed Cycle* OTEC

Setelah Penentuan jenis sistem lalu dapat ditentukan siklus kerja OTEC yaitu menggunakan Closed System untuk perancangan pembangkit listrik OTEC di Bali Utara. Dipilih Closed Cycle daripada Open Cycle dengan pertimbangan ssebagai berikut :

1. Jika menggunakan open cycle maka ukuran turbin dan heat exchanger menjadi sangat besar karena tekanan uap yang rendah.
2. Mereduksi biaya investasi dari subsitem tersebut dikarenakan ukuran subsistem akan memngaruhi biaya dari perancangan tersebut.
3. Ketersediaan dengan ukuran turbin yang tidak terlalu besar akan mudah didapatkan di pasaran.

#### 4.3.3 Pertimbangan pemilihan fluida kerja OTEC

Untuk fluida kerja yang dipilih adalah Ammonia atau  $\text{NH}_3$ . Ammonia tersusun atas gas nitrogen dan hidrogen. Ammonia merupakan senyawa yang stabil, tidak berbau tajam, dan larut didalam air. Pada pertimbangan pemilihan fluida kerja ini dikarenakan yang pertama , ammonia merupakan fluida kerja utama yang biasa digunakan pada sistem pembangkit OTEC siklus tertutup . Siklus sistem OTEC yang tertutup menggunakan Amonia sebagai fluida kerja. Amonia memiliki titik didih jauh lebih rendah daripada air. Air di permukaan laut itu hangat cukup untuk memanaskan fluida kerja dan menyebabkan termodinamika siklus mesin panas terjadi. Dengan perancangan di bali ini kondisinya memungkinkan karena plant pembangkit itu sendiri jauh dari daerah pemukiman dan tempat wisata jadi aman untuk lingkungan sekitar.

Amonia mempunyai titik lebur yang rendah yaitu  $-77,73^\circ\text{C}$ . Untuk titik kritis amonia pada kondisi suhu  $132,25^\circ\text{C}$  dan tekanan 11,33 MPa. Untuk tekanan 1 MPa amonia mempunyai titik didih pada suhu  $24,9^\circ\text{C}$ . Kondisi ini menunjukkan dengan mensetting tekanan kerja pada amonia dengan tekanan 1 MPa, makaa untuk perubahan wujud dari cair menjadi uap dapat diperoleh dengan mensetting temperatur minimal  $24,9^\circ\text{C}$ . (NIST, 2013)

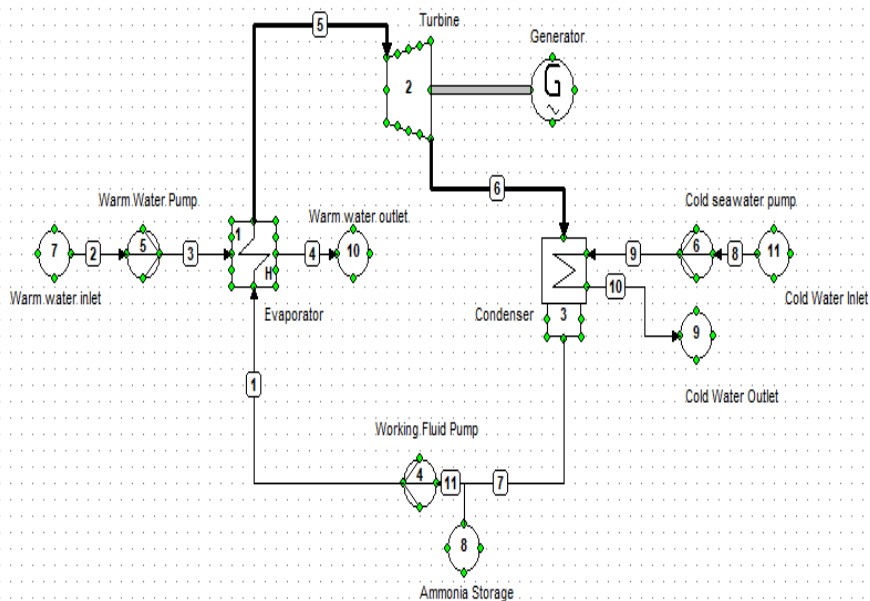
Tabel 4.3 Rancangan OTEC

Rancangan OTEC di Bali Utara	
Jenis OTEC	: Land Based System
Sistem Kerja	: Closed Cycle
Fluida Kerja	: NH3 atau Ammonia

#### 4.4 Pemodelan Sistem OTEC

Pemodelan Ocean Thermal Energy Conversion ini digunakan Siklus Tertutup pada rancangan power plan. Digunakan Software Cycle Tempo untuk membuat model tersebut. Dalam memodelkan sistem Siklus Tertutup digunakan berbagai model yang tersedia dalam software Cycle Tempo 5.1. Model ini disesuaikan dengan skema tipikal pada sistem OTEC land based.

Ocean Thermal Energy Conversion



Gambar 4. 16 Skema Closed Cycle OTEC pada Cycle Tempo 5.1



Cara kerja pada skema closed cycle OTEC sebagai berikut:

1. Ammonia dipompa oleh Working Fluid Pump menuju ke Evaporator
2. Air laut hangat dan air laut dingin di pompa ke Evaporator dan Condenser
3. Evaporator menggunakan air laut hangat untuk mengevaporasikan fluida kerja
4. Hasil evaporasi menjadikan uap bertekanan untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik oleh generator
5. Uap sisa dari turbin masuk ke Condenser dimana air laut dingin digunakan untuk mengkondensasi uap menjadi fluida
6. Fluida kembali ke pompa dan siklus ini berulang.

#### 4.5 Perhitungan SubSistem OTEC

Sesuatu yang tidak dapat dipisahkan pada konsep OTEC adalah penggunaan air dingin yang diambil dari kedalaman 600 m untuk mendinginkan dan menglikuifikasi uap fluida kerja pada sistem. Perhitungan daya ini tergantung pada laju aliran massa dan tekanan ke sistem heat exchanger OTEC.

4.5.1 Perhitungan *flow rate* atau besarnya fluida yang dipindahkan dengan menggunakan persamaan (8) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m_{\text{wsw}} &= \rho \cdot v \cdot A \\ &= \rho \cdot v \cdot D^2 \cdot (\pi/4) \end{aligned}$$

Dengan ini parameter-paramater yang akan ditetapkan dalam perhitungan , untuk menghitung persamaan flow rate air laut hangat ini ditetapkan dan diketahui untuk  $\rho$  : massa jenis air laut ini :  $1025 \text{ kg/m}^3$  , untuk kecepatan aliran sudah ditetapkan atau di estimasikan sebesar  $v$  :  $2 \text{ m/s}$ . Untuk diameter pipa air laut hangat ditetapkan sebesar :  $0,5 \text{ meter}$ . Berikut perhitungan flow rate dari ketentuan diatas sebagai berikut,

Dengan persamaan (6) dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m_{\text{wsw}} &= \rho \cdot v \cdot A \\ &= \rho \cdot v \cdot D^2 \cdot (\pi/4) \\ &= 1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 2 \text{ m/s} \cdot (0,5)^2 \cdot 3,14/4 \\ &= 402,3 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Untuk kapasitas sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q &= 402,3 \text{ kg/s} \\ &= 1.448.280 \text{ kg/h} \\ &= 1448280/1025 \times 1 \text{ m}^3 \\ &= 1412,95 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

Untuk laju aliran massa air laut hangat adalah sebesar 402 kg/s dan kapasitas 1412,95 m<sup>3</sup>/h

Setelah itu untuk menghitung persamaan flow rate air laut dingin ini ditetapkan dan diketahui untuk : massa jenis air laut ini : 1025 kg/m<sup>3</sup> , untuk kecepatan aliran sudah ditetapkan atau di estimasikan sebesar  $v : 2 \text{ m/s}$ . Untuk diameter pipa air laut dingin ditetapkan sebesar : 1 meter. Berikut perhitungan flow rate dari ketentuan diatas sebagai berikut ,

Dengan menggunakan persamaan (8) laju aliran massa air dingin dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{csw}} &= \rho \cdot v \cdot A \\ &= \rho \cdot v \cdot D^2 \cdot (\pi/4) \\ &= 1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 2 \text{ m/s} \cdot (1)^2 \cdot 3,14/4 \\ &= 1092,2 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Untuk kapasitas sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q &= 1092,2 \text{ kg/s} \\ &= 3.931.920 \text{ kg/h} \\ &= 3.931.920/1025 \times 1 \text{ m}^3 \\ &= 3836,01 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

Untuk laju aliran massa air laut dingin adalah sebesar 1609,92 kg/s dan kapasitas sebesar 3836,01 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.5.2 Perhitungan Daya Pompa Air laut

Pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan perhitungan daya pompa dari pompa air laut yaitu pompa air laut hangat dan pompa air laut dingin. Air laut masuk evaporator pada temperatur 28°C dan masuk kondenser pada temperatur 5°C. Berdasarkan persamaan untuk menghitung daya pompa, diperoleh rumusan seperti berikut dengan menggunakan persamaan (9) sebagai berikut :

$$W_{\text{pump}} = \dot{m}_{\text{ws}} \cdot v_1 \cdot \Delta P$$

Dimana,  $\dot{m}_{\text{ws}}$  merupakan laju aliran massa air laut hangat sebesar 402,3 kg/s,  $\dot{m}_{\text{csw}}$  merupakan laju aliran massa air laut dingin sebesar 1092,2 kg/s ,  $v_1$  merupakan volume spesifik dari air laut sebesar 0,00137 m<sup>3</sup>/kg, dan  $\Delta P$  merupakan tekanan pompa. Dari data ini diperoleh sebagai berikut ,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{ws}} &= 402,3 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{csw}} &= 1092,2 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

$$v_1 = 0,00137 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Untuk perhitungan tekanan pada *warm water pump* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (10) sebagai berikut :

$$(P_1 - P_2) = \left( \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) + K \left( \frac{V^2}{2} \right) + f \left( \frac{Le}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \right) + gz^2 \times \rho$$

Dengan parameter yang sudah ditetapkan seperti berikut,

$P_2 = 0$  (gage) Pa,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $z_1 = 0$ ,  $z_2 = 2 \text{ m}$ ,  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $L = 30 \text{ m}$ ,  $D = 0,5 \text{ m}$ ,  $f = 0,020$ ,  $K = 0,28$  (rounded entrance),  $Le/D = 8$  (gate valve) dan 30 (standart elbow  $90^\circ$ ) berdasarkan buku introduction to fluid mechanics, Fox and McDonald.

$$\begin{aligned} (P_1 - P_2) &= \left( \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) + K \left( \frac{V^2}{2} \right) + f \left( \frac{Le}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \right) + gz^2 \times \rho \\ &= (0,021 \cdot 30 \cdot 2^2 / 0,5 \cdot 2) + (0,28 \cdot 2^2 / 2) + (0,021 \cdot (8+30) \cdot 2 / 2) + \\ &\quad (9,81 \cdot 2) \cdot 1025 \\ &= (2,52 + 0,56 + 1,026 + 19,62) \cdot 1025 \\ &= 24319,15 \text{ Pa} \\ &= 0,243 \text{ bar (gage)} = 1,25 \text{ bar (absolute)} \end{aligned}$$

Sedangkan untuk perhitungan tekanan pada *cold water pump* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (10) sebagai berikut :

$$(P_1 - P_2) = \left( \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) + K \left( \frac{V^2}{2} \right) + f \left( \frac{Le}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \right) + gz^2 \times \rho$$

Dengan parameter yang sudah ditetapkan seperti berikut,

$P_2 = 0$  (gage) Pa,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $z_1 = 0$ ,  $z_2 = 2 \text{ m}$ ,  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $L = 3400 \text{ m}$ ,  $D = 1 \text{ m}$ ,  $f = 0,020$ ,  $K = 0,28$  (rounded entrance),  $Le/D = 8$  (gate valve) dan 30 (standart elbow  $90^\circ$ ) berdasarkan buku introduction to fluid mechanics, Fox and McDonald.

$$\begin{aligned} (P_1 - P_2) &= \left( \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) + K \left( \frac{V^2}{2} \right) + f \left( \frac{Le}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \right) + gz^2 \times \rho \\ &= (0,021 \cdot 3400 \cdot 2^2 / 1 \cdot 2) + (0,28 \cdot 2^2 / 2) + (0,021 \cdot (8+30) \cdot 2 / 2) + \\ &\quad (9,81 \cdot 2) \cdot 1025 \\ &= (138,72 + 0,56 + 0,513 + 19,62) \cdot 1025 \\ &= 163398 \text{ Pa} \\ &= 1,63 \text{ bar (gage)} = 2,6 \text{ bar (absolute)} \end{aligned}$$

Sedangkan untuk menghitung Head Losses pada pompa sebagai contoh dihitung untuk headloss pada pompa air laut hangat dengan sebagai berikut :

- Perhitungan head statis pompa (Hs)  
 Nilai dari head statis dihitung dari perbedaan ketinggian dari sisi hisap dan sisi buang, dihitung dengan persamaan;

$$H_s = Z_{discharge} - Z_{suction}$$

Dimana,

Hs = Head Statis (m)

Zdischarge = ketinggian sisi buang (10 m)

Zsuction = ketinggian sisi hisap (2 m)

Sehingga, hasil dari perhitungan adalah:

$$H_s = Z_{discharge} - Z_{suction}$$

$$H_s = 8 \text{ m}$$

- Perhitungan head velocity pompa (Hv)  
 Nilai dari head kecepatan akan memiliki nilai apabila terdapat perbedaan kecepatan diantara sisi hisap dan sisi buang, Tidak ada perbedaan kecepatan pada sisi hisap dan buang

$$H_v = 0 \text{ m}$$

- Head Losses di Suction Line

a. Mayor Losses

- Reynold Number

$$R_n = (v \times d) / \nu$$

$$\text{Dimana diketahui : } v = 2 \text{ m/s , } d = 0.508 \text{ m, } \nu = 0.00010037 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\begin{aligned} R_n &= (v \times d) / \nu \\ &= (2 \times 0.508) / 0.00010037 \\ &= 10122.54658 \end{aligned}$$

- Friction Losses

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.02 + 0.0005 / d \\ &= 0.02 + 0.0005 / 0.508 \\ &= 0.020984252 \end{aligned}$$

- Mayor Losses

$$HL_{1s} = \lambda \times L \times v^2 / (d \times 2g) \text{ [m]}$$

Dimana diketahui  $\lambda = 0.020984252$  ,  $L = 30 \text{ m}$  ,  $v = 2 \text{ m/s}$  ,  $d = 0.508 \text{ m}$  ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$$\begin{aligned} HL_{1s} &= \lambda \times L \times v^2 / (d \times 2g) \text{ [m]} \\ &= 0.021016 \times 30 \times (2^2) / (0.508 \times 2 \times 9.8) \\ &= 0.252903567 \text{ m} \end{aligned}$$

Minor losses terjadi dikarenakan instalasi aksesoris pipa di sistem sebagai berikut :

Tabel 4. 14 Koefisien Aksesoris Pipa Suction

No.	Type	n	k	n x k
1	Gate Valve	1	1.2	1.2
2	Strainer	2	1.91	3.82
3	Butterfly valve	3	0.12	0.36
4	T joint	1	0.9	0.9
5	Elbow 90°	2	1.265	2.53
			Total	8.81

- Minor losses  
 $MLs = K_{total} \times v^2 / 2g$   
 $= 8.81 \times (2^2) / (2 \times 9.8)$   
 $= 1.797959184 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \text{Total Losses at Suction Line} &= HL_{1s} + MLs \\ &= 0.2529 + 1.79796 \\ &= 2.050862751 \text{ m} \end{aligned}$$

#### b. Head Losses at Discharge Line

- Reynold Number  
 $Rn = (v \times d) / \nu$   
 $= (2 \times 0.508) / 0.00010037 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $= 10122.54658 \text{ m}$
- Friction Losses  
 $\lambda = 0.02 + 0.0005 / d$   
 $= 0.02 + 0.0005 / 0.508$   
 $= 0.020984252$

- Head Loss Mayor  

$$HL_{1d} = \lambda \times L \times v^2 / (d \times 2g) \text{ [m]}$$

$$= 0.02098 \times 10 \times (2^2) / (0.508 \times 2 \times 9.8)$$

$$= 0.084301189 \text{ m}$$
- Minor Losses  

$$ML_d = K_{total} \times v^2 / 2g$$

Minor losses terjadi dikarenakan installasi aksesoris pipa di sistem sebagai berikut :

Tabel 4. 15 Koefisien Aksesoris Pipa Discharge

No.	Type	n	k	n . k
1	Butterfly valve	3	0.12	0.36
2	SDNRV	3	1.39	4.17
3	T Joint	1	0.9	0.9
			Total	5.43

- $ML_d = K_{total} \times v^2 / 2g$   

$$= 5.43 \times (2^2) / (2 \times 9.8)$$

$$= 1.108163265 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Losses at Discharge Line} &= HL_{1d} + ML_d \\ &= 0.0843 + 1.10916 \\ &= 1.192464454 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Head Losses} &= \text{Total Losses at Suction Line and Discharge Line} \\ &= 2.0509 + 1.1925 \\ &= 3,24 \text{ m} \end{aligned}$$

Berikut adalah Tabel hasil perhitungan Headlosses pada setiap pompa :

	Re	f	Hsuc	Hdis	Htotal
Warm Water Pump	10122,54	0,0209	2,05	1,2	11,2
Cold Water Pump	20245,09	0,0204	15,79	1,14	574,95
Working Fluid Pump	6454,11	0,0215	1,132	0,49	2,625

Untuk perhitungan kebutuhan daya pompa air hangat ditetapkan , dimana,  $m_{csW}$  merupakan laju aliran massa air laut dingin sebesar 402,3 kg/s,  $v_1$  merupakan volume spesifik dari air laut sebesar 0,0010037 m<sup>3</sup>/kg di 28°C, dan  $\Delta P$

merupakan tekanan pompa sebesar 1,25 bar. Dengan persamaan (9) dapat dihitung daya pompa air laut hangat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} W_{pump_{ws}} &= m_{ws} \cdot v_1 \cdot \Delta P \\ &= 402,3 \text{ kg/s} \cdot 0,0010037 \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot (1,25) \cdot 10^5 \text{ kg/ms}^2 \cdot 1 \text{ kW}/10^3 \text{ W} \\ &= 50,47 \text{ kW} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan kebutuhan pompa air hangat ditetapkan , dimana,  $m_{cs}$  merupakan laju aliran massa air laut dingin sebesar 402,3 kg/s,  $v_1$  merupakan volume spesifik dari air laut sebesar 0,001001 m<sup>3</sup>/kg di 5°C, dan  $\Delta P$  merupakan tekanan pompa sebesar 2,6 bar. Dengan persamaan (9) dapat dihitung daya pompa air laut dingin sebagai berikut :

$$\begin{aligned} W_{pump_{cs}} &= m_{cs} \cdot v_1 \cdot \Delta P \\ &= 1092,2 \text{ kg/s} \cdot 0,001001 \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot (2,6) \cdot 10^5 \text{ kg/ms}^2 \cdot 1 \text{ kW}/10^3 \text{ W} \\ &= 284,25 \text{ kW} \end{aligned}$$

#### 4.5.3 Perhitungan laju aliran massa , daya pompa fluida kerja dan Performa Sistem Pembangkit

Untuk menghitung laju aliran massa fluida menggunakan persamaan (10) sebagai berikut :

$$m_{wf} = m_{sw} \cdot (C_{pcw}/C_{pwf}) \cdot ((T_{cwout} - T_{cwin}) / (T_{wfin} - T_{wfout}))$$

Dimana ; untuk  $m_{sw}$  sebesar 402,3 kg/s ;  $C_{pcw}$  sebesar 4,23 kJ/kg.k ,  $C_{pwf}$  sebesar 4,76 kJ/kg.k ;  $T_{cwout}$  sebesar 7,5°C ;  $T_{cwin}$  sebesar 5 °C ;  $T_{wfin}$  sebesar 17 °C ;  $T_{wfout}$  sebesar 10 °C.

$$\begin{aligned} m_{wf} &= m_{sw} \cdot (C_{pcw}/C_{pwf}) \cdot ((T_{cwout} - T_{cwin}) / (T_{wfin} - T_{wfout})) \\ &= 402,3 \cdot (4,23/4,76) \cdot ((7,5-5)/(17,84-10)) \\ &= 402,3 \cdot 0,888 \cdot 0,4167 \\ &= 148,57 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Untuk kapasitas sebagai berikut ;

$$\begin{aligned} Q &= 148,57 \text{ kg/s} \\ &= 534.852 \text{ kg/h} \\ &= 534.852 / 1025 \times 1 \text{ m}^3 \\ &= 521,8 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 0,14494444 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan diameter pipa sebagai berikut :

$$\begin{aligned} d &= ((Q \times 4) / (3,14 \times v))^{0,5} \\ d &= \sqrt{(0,1449444) / (2 \times 0,25 \times 3,14)} \\ &= 0,303844207 \text{ [m]} \end{aligned}$$

Pada penelitian ini didapatkan laju air massa fluida kerja sebesar 148,57 kg/s. Hal ini akan mengakibatkan adanya perbedaan tekanan kerja pada evaporator dan kondenser. Hal ini akan berdampak pada performa dari sistem pembangkit tersebut, antara lain daya turbin yang dihasilkan, kerja pompa dari fluida kerja, kerja netto, serta efisiensi thermal sistem.

Pada kondisi 1 temperatur fluida kerja turun karena adanya pertukaran panas dari ammonia ke air laut hangat yang ditetapkan sebesar 26°C yang mana tidak bisa sama dengan suhu permukaan laut tetapi ini adalah perkiraan. Kondisi ini terjadi pada saat fluida kerja setelah keluar dari evaporator.

Enthalphy , Enthrophy , Tekanan pada kondisi 1 dapat ditemukan pada *Thermodynamic properties of saturated Ammonia*. Sehingga didapatkan sebagai berikut ,

T1 : 26°C  
h1 : 1466,5 kJ/kg  
s1 : 5,027 kJ/kg . K  
P1 = P4 : 10,34 bar : 1034 kPa  
v1 : 0,1245 m<sup>3</sup>/kg

Pada kondisi 3 pada saat fluida kerja telah terkondensasi maka temperatur fluida kerja pada saat kondisi ini ditetapkan sebesar 10°C yang berada pada saat subcooled .Enthalphy , Enthrophy , Tekanan pada kondisi 3 dapat ditemukan pada *Thermodynamic properties of saturated Ammonia*. Sehingga didapatkan sebagai berikut ,

T3 : 10°C  
h3 : 227,8 kJ/kg  
s3 : 0,881 kJ/kg . K  
P2 = P3 : 6,149 bar : 614,9 kPa  
v3 : 0,2056 m<sup>3</sup>/kg



Tabel 4. 16 Thermodynamic Properties of Saturated Ammonia

Saturated Properties						
Temperature - $t_s$ - ( $^{\circ}\text{C}$ )	Pressure - $P_s$ - (bar)	Specific Volume - $v_f$ - ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )	Specific Enthalpy		Specific Entropy	
			saturated liquid - $h_f$ - ( $\text{kJ/kg}$ )	saturated vapor - $h_g$ - ( $\text{kJ/kg}$ )	saturated liquid - $s_f$ - ( $\text{kJ/kgK}$ )	saturated vapor - $s_g$ - ( $\text{kJ/kgK}$ )
8	5.736	0.2198	218.5	1452.5	0.849	5.238
10	6.149	0.2056	227.8	1454.3	0.881	5.213
12	6.585	0.1926	237.2	1456.1	0.914	5.189
14	7.045	0.1805	246.6	1457.8	0.947	5.165
16	7.529	0.1693	256.0	1459.5	0.979	5.141
18	8.035	0.1590	265.5	1461.1	1.012	5.118
20	8.570	0.1494	275.1	1462.6	1.044	5.095
22	9.134	0.1405	284.6	1463.9	1.076	5.072
24	9.722	0.1322	294.1	1465.2	1.108	5.049
26	10.34	0.1245	303.7	1466.5	1.140	5.027
28	10.99	0.1173	313.4	1467.8	1.172	5.005
30	11.67	0.1106	323.1	1468.9	1.204	4.984

Kondisi 2 proses ini terjadi pada saat uap ammonia di turbin outlet atau di condenser inlet. Uap air dari evaporator masuk ke turbin dan mengalami proses ekspansi secara isentropik. Energi yang tersimpan di dalam uap air dikonversi menjadi energi gerak pada turbin. Dengan menggunakan data cairan jenuh dan uap pada tekanan , kualitas pada kondisi 2 dengan menggunakan persamaan (2) dan (3) adalah sebagai berikut :

$$S2 = Sf1 + x2s (Sfg)$$

$$4,3799 = 0,881 + x2s (4,3799)$$

$$4,9948 - 0,881 = x2s \cdot 4,3799$$

$$x2s = (s1 - sf) / sfg$$

$$= 4,1179 / 4,3799$$

$$= 0,9401$$

$$h2 = hf + x2s (hfg)$$

$$= 227,8 + 0,9401 (1227,79)$$

$$= 1390,82 \text{ kJ/kg}$$

Kondisi 4 selanjutnya pada kondisi ini input daya pompa dan input daya pompa total akan dihitung bersama dengan entalpi di Point 4. Pada kondisi ini ditetapkan oleh tekanan  $P1 = P4$  dan entropi spesifik  $s4 = s3$  . Dengan menggunakan persamaan (10) sebagai berikut kita bisa mendapatkan nilai  $h4$  :

$$h4 = h3 + Wp/m$$

$$= h3 + v3(P4 - P3)$$

$$= 227,8 + 0,2056 (1034,3 - 614,9)$$

$$= 227,52 \text{ kJ/kg}$$

Kerja yang dilakukan oleh pompa fluida dengan menggunakan persamaan (9) sebagai berikut ;

$$\begin{aligned}
 Wp &= mwf.(h4-h3) \\
 &= 148,57 \text{ kg/s } (227,52-226,75) \text{ kJ/kg} \\
 &= 181,25 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Kerja yang dihasilkan oleh turbin dengan menggunakan persamaan (1) sebagai berikut ;

$$\begin{aligned}
 Wt &= mwf.(h1-h2) \\
 &= 148,57 \text{ kg/s } ( 1466,5 - 1390,82) \text{ kJ/kg} \\
 &= 11.020 \text{ kW} \\
 &= 11,02 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Kalor yang diserap oleh evaporator dengan menggunakan persamaan (5) sebagai berikut ;

$$\begin{aligned}
 Qin &= mwf.(h1-h4) \\
 Qin &= 148,57.(1466,5-227,52) \\
 &= 175.969 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

Maka diperoleh efisiensi termal dengan menggunakan persamaan (4) sebagai berikut ;

$$\begin{aligned}
 \eta &= (Wt-Wp-Wpcw-Wpww)/Qin \\
 \eta &= (11.020-181,25-218,65-80,75)/175969 \times 100\% \\
 &= 10.504,03 / 175969 \times 100\% \\
 &= 5,9 \%
 \end{aligned}$$

#### 4.5.4 Perhitungan Heat Exchanger

Pada desain ini digunakan untuk heat exchanger OTEC dengan jenis yang paling umum adalah shell-and-tube dengan air laut hangat (atau dingin) di dalam tabung dan menguap (atau mengembunkan) ammonia pada sisi shell. Material heat exchanger dipilih adalah Red Brass yang terdiri dari 85% Cu dan 15% Zn dan memiliki nilai  $U = 159 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Red brass memiliki biaya relatif lebih rendah dengan perpindahan panas yang baik dan karakteristik antifouling. Area heat exchanger ( $A_h$ ) dari evaporator dapat dihitung dengan mengetahui Log Mean Temperature Difference (LMTD), panas yang masuk di evaporator, ketebalan transfer panas material ( $t_h$ ) dan konduktivitas termal untuk bahan transfer panas. Untuk perhitungan LMTD menggunakan persamaan (6) dan Perhitungan  $A_h$  menggunakan persamaan (7) sebagai berikut :

##### a. Evaporator

Diketahui :

$$\Delta T1 = 4^\circ\text{C} ; \Delta T2 = 2^\circ\text{C} ; Th = 1 \text{ mm} ; Qin = 175969 \text{ kJ/s} ; U = 159 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = (2+2) / \ln(2/2) = 6 / 0.69 = 8,6$$

$$A_h = \frac{th \times Q_{in}}{U \times LMTD} = (1 \times 175959) / (159 \times 8,6) = 128 \text{ m}^2$$

b. Condensor

Diketahui :

$\Delta T_1 = 15^\circ\text{C}$  ;  $\Delta T_2 = 1,5^\circ\text{C}$  ;  $T_h = 1 \text{ mm}$  ;  $U = 159 \text{ W / m}^\circ\text{C}$  ;  $Q_{out} = 172161 \text{ kw}$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = (15+1,5) / (\ln 15 / 1,5) = 16,5 / 0,74 = 22,29$$

$$A_h = \frac{th \times Q_{out}}{K \times LMTD} = (1 \times 172161) / (159 \times 22,29) = 48,57 \text{ m}^2$$

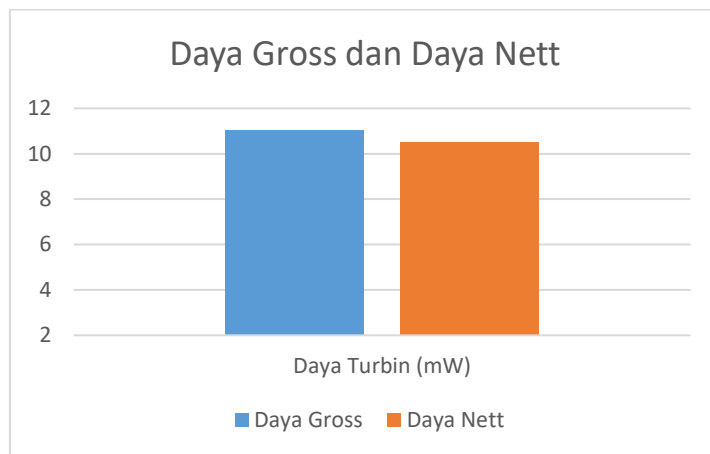
Tabel 4. 17 Parameter OTEC

Parameter	Value
Seawater inlet temperature (°C)	
Surface seawater	29
Deep Seawater	5
Seawater Outlet temperature (°C)	
Surface seawater	22
Deep Seawater	7,5
Mass Flow Rate (kg/s)	
Warm Sea water	402,3
Cold Sea Water	1092,2
Working Fluid	148,57
Kedalaman pompa air laut (m)	
Warm Sea water	20
Cold Sea Water	600
Working Fluid Outlet Temperature (°C)	
in Evaporator	26
in Condenser	10
Working Fluid	NH3
Working Fluid Inlet Temperature (°C)	
In Evaporator	20
In Condenser	15

Tabel 4. 18 Power Output OTEC

Power output consumption (kW)	
Turbine output	11.020
Working fluid pump power consumption	181,25
Warm seawater pump power consumption	50,47
Cold seawater pump power consumption	284,25
Net power output	10.504
Net thermal efficiency	5,9 %

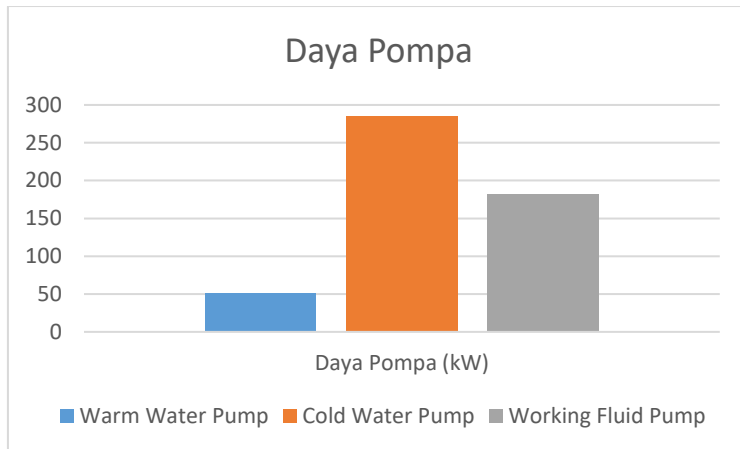
Berikut adalah perbandingan hasil daya gross dan daya nett yang ditunjukkan pada perhitungan diatas sebagai berikut ;



Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Daya Gross dan Daya Nett

Dari gambar diagram diatas merupakan hasil daya gross dengan daya net yang mana perbandingan hasil perhitungan sistem OTEC didapati perbedaan daya nett yang dihasilkan sebesar 10,50 MW dan perhitungan daya gross didapati sebesar 11,01 MW , disini terdapat perbedaan sebesar 0,51 MW yaitu adalah daya parasitic oleh sistem tersebut.

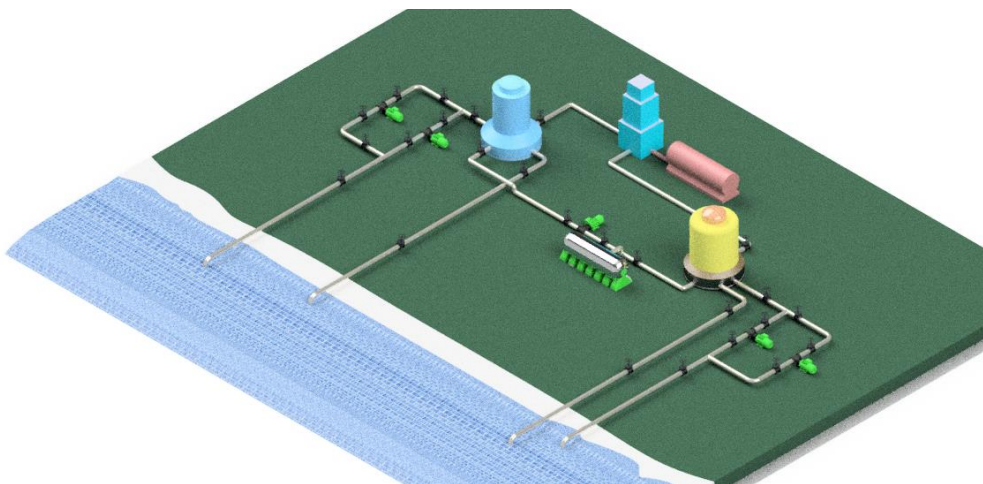
Berikut adalah daya yang dibutuhkan oleh sistem yaitu daya masing pompa yang dibutuhkan sebagai berikut ,



Gambar 4.18 Grafik Daya Pompa dan Daya Parasitic

Dari gambar diagram diatas merupakan hasil daya yang dibutuhkan suatu sistem OTEC ini dengan antara lain daya pompa air laut hangat yang sebesar 50,47 kW dan daya pompa air laut dingin 284,25 kW serta daya pompa fluida kerja ammonia sebesar 181,25 kW. Dengan ini daya total yang dibutuhkan sistem tidak melebihi daya yang dihasilkan sebagaimana dinamakan sebagai daya parasitic ini bisa disebutkan dengan total 515,97 kW. Dengan mengetahui daya yang dibutuhkan didapatkan daya netto dari sistem OTEC ini.

#### 4.6 Desain OTEC



Gambar 4.19 Desain 3D OTEC

Pada gambar 4.8 merupakan desain 3D menggunakan software autodesk inventor yang mana mempunyai subsistem yang dibutuhkan sebagai berikut :

#### 4.6.1 Pipa

##### a. Warm seawater pipe

Tabel 4. 19 Warm Water Pipe Specification

Nominal Size		=	20	inches
Inside Diameter	(dH)	=	19.57	inches
		=	496.88	mm
Outside Diameter	(da)	=	20	inches
		=	508	mm
Schedule Number		=	10s	
		=		
Thickness	(s)	=	0.21	inches
		=	5.56	mm
Selected Pipe	=	ANSI B36.19		
Type	=	Stainless Steel		

##### b. Cold Water Pipe

Tabel 4. 20 Cold Water Pipe Specification

Nominal Size		=	40	Inches
Inside Diameter	(dH)	=	39.59	inches
		=	1004.88	mm
Outside Diameter	(da)	=	40	inches
		=	1016	mm
Schedule Number		=	10	
		=		
Thickness	(s)	=	0.312	inches
		=	7.9292	mm
Selected Pipe	=	ANSI B36.19		
Type	=	Stainless Steel		

c. Working Fluid Pipe

Tabel 4. 21 Working Fluid Pipe Specification

Nominal Size		=	12	Inches
		=		
Inside Diameter	(dH)	=	12,1	inches
		=	309,1	mm
Outside Diameter	(da)	=	12,7	inches
		=	323,9	mm
Schedule Number		=	10s	
		=		
Thickness	(s)	=	0,18	inches
		=	4,58	mm
Selected Pipe	=	ANSI B36.19		
Type	=	Stainless Steel		

4.6.2 Pompa

a. Warm water pump

Required Capacity : 1413 m<sup>3</sup>/h

Required Head : 3,2 m

Power : 80,75 kw

b. Cold water pump

Required Capacity : 3836 m<sup>3</sup>/h

Required Head : 17 m

Power : 218,65 kw

c. Ammonia pump

Required Capacity : 522 m<sup>3</sup>/h

Required Head : 1,6 m

Power : 181,25 kw

#### 4.6.3 Kondensor

Shell & Tube Condensor

Water inlet temperature : 5°C

Water outlet temperature : 7,5°C

Material : Red Brass (85% Cu & 15% Zn)

Ah : 48,57

#### 4.6.4 Evaporator

Water inlet temperature : 28°C

Water outlet temperature : 22°C

Material : Red Brass (85% Cu & 15% Zn)

Ah : 128 m<sup>2</sup>

#### 4.6.5 Turbine - generator

Inlet temperature : 26 °C

Outlet temperature : 18 °C

Working fluid : NH<sub>3</sub>

Power : 11,01 MW

Net power : 10,5 MW



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Melalui penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan yang dapat diambil oleh penulis sebagai berikut :

1. Perbedaan temperatur pada permukaan laut ( $29,1^{\circ}\text{C}$ ) dan kedalaman laut 600 m ( $5,1^{\circ}\text{C}$ ) sebesar  $23,9^{\circ}\text{C}$  cukup potensial untuk diaplikasikan Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC).
2. Energi yang dihasilkan oleh OTEC sebesar 10,5 MW mampu menciptakan kawasan energy mandiri di Bali Utara.

#### **5.2 Saran**

Setelah melakukan perancangan pembangkit listrik Ocean Thermal Energy Conversion di Pulau Bali Utara , terdapat beberapa saran yang dapat diberikan oleh penulis sebagai berikut :

1. Perlu dikembangkan jaringan sistem kelistrikan dari perancangan OTEC tersebut.
2. Perlu dikembangkan perhitungan pembangunan dan ekonomis dari perancangan OTEC tersebut.
3. Perlu ditambahkan masterplan dari perancangan OTEC di Bali Utara.
4. Diperlukan analisa lebih lanjut untuk menghitung nilai ekonomis antara biaya operasional dan keuntungan daya yang diperoleh.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anon., 2010. *Baliprov*. [Online]  
Available at: [www.baliprov.go.id](http://www.baliprov.go.id)
- [2] Bechtel, M. & Netz, E., 2016. OTEC - Ocean Thermal Energy Conversion. *Exergy*.
- [3] Division, W. O. T., 1989. *Ocean Thermal Energy Conversion*, Washington DC: Solar Technical Information Program.
- [4] Jianying Gong, T. G. ., G. L., 2012. Performance Analysis of 15 kW Closed Cycle Ocean Thermal Energy Conversion System With Different Working Fluids. *J. Sol. Energy Eng* , Volume 135, p. 5.
- [5] Koto, J., 2016. 10 MW Plant Ocean Thermal Energy Conversion in Morotai Island North Maluku Indonesia. *Journal of Subsea and Offshore* , pp. 7-14.
- [6] Martin, L., 2008. *Lockheed Martin*. [Online]  
Available at: [www.lockheedmartin.com](http://www.lockheedmartin.com)  
[Accessed 3 02 2018].
- [7] Riyadi, S., 2015. KAJIAN POTENSI SUHU AIR LAUT. *Jurnal Sain dan Teknologi*, Volume 10, Nomor 1, pp. 78-90.
- [8] Sinuhaji, A. R., 2015. Potential Ocean Thermal Energy Conversion in Bali. *ISSN*, pp. 5-12.
- [9] strath, e., 2008. *OTEC*. [Online]  
Available at: [http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/98-9/offshore/otec.htm](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/98-9/offshore/otec.htm)  
[Accessed 5 3 2018].
- [10] Websdale, E., 2014. *Ocean Thermal Energy Corporation: Shaping a Sustainable Future*. [Online]  
Available at: <http://otecorporation.com/2014/03/24/ocean-thermal-energy-corporation-sustainable/>  
[Accessed 03 05 2018].
- [11] Yasser, A., 2008. *OTEC SUSTAINABLE ENERGY*. Bandung: s.n.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Sidoarjo, 06 Juni 1996, merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal dengan memulai di TK Aisyiyah Bustanul Athfal IV Sidoarjo. Setelah itu melanjutkan pendidikan dasar di SDN Pucang 3 Sidoarjo dan melanjutkan di pendidikan menengah SMP Negeri 5 Sidoarjo. Setelah itu melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 2 Sidoarjo. Setelah lulus dari SMA Negeri 2 Sidoarjo di tahun 2014, Penulis melanjutkan pendidikan tinggi sarjana pada tahun 2014 di jurusan Teknik Sistem Perkapalan – Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Yang mana terdaftar dengan NRP 4214100107.

Semasa pendidikan kuliah, penulis aktif di beberapa kegiatan organisasi BEM FTK 2015-2016. Penulis aktif mengikuti kepanitian acara jurusan Marine Icon setiap tahunnya. Penulis juga sering mengikut kepelatihan maupun seminar yang diselenggarakan Jurusan maupun Fakultas dan aktif sebagai grader mata kuliah elektronika perkapalan di Laboratorium Marine Electrical and Automation System.